

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA**

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRICA LS

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E
DELL'INFORMAZIONE – GUGLIELMO MARCONI - DEI**

TESI DI LAUREA

in

Modellistica dei sistemi elettromeccanici LS

**STUDIO DI UN APPROCCIO NON INVASIVO PER LA
MANUTENZIONE DEGLI ACCUMULATORI
ELETTROCHIMICI CHE EQUIPAGGIANO LA
LOCOMOTIVA E464**

CANDIDATO
Carlo Foresi

RELATORE
Chiar.mo Prof. Angelo Tani

CORRELATORI
Sig. Pietro Arosio
Ing. Simone Maistrello

Anno Accademico 2011/12

Sessione II

*Alla famiglia
sostegno insostituibile*

INDICE

<u>CAPITOLO 1</u>	Introduzione	11
1.1	<i>Cenni storici della struttura ospitante</i>	11
1.2	<i>Locomotiva E464</i>	15
1.2.1	Descrizione generale	15
1.2.2	Circuiti di bassa tensione	23
<u>CAPITOLO 2</u>	Batteria	29
2.1	<i>Cenni sulla batteria NiCd ventilata</i>	29
2.2	<i>Principio di funzionamento</i>	30
2.3	<i>Performance e comportamento</i>	33
2.4	<i>Fattori di invecchiamento</i>	36
2.5	<i>Uso della batteria nella locomotiva</i>	36
<u>CAPITOLO 3</u>	Manutenzione	41
3.1	<i>Manutenzione programmata</i>	41
3.2	<i>Condition Based Maintenance</i>	45
3.3	<i>Progetto di telediagnostica</i>	49
<u>CAPITOLO 4</u>	Test di laboratorio	53
4.1	<i>Circuito di prova</i>	54
4.2	<i>Tipologie di prove effettuate</i>	56
4.3	<i>Evidenze sperimentali in fase di scarica</i>	58
4.3.1	Cell reversal	61
4.3.2	Riduzione di capacità	64
4.3.3	Andamento della tensione	67
4.4	<i>Evidenze sperimentali in fase di ricarica</i>	69
4.4.1	Anticipo della commutazione	69
4.4.2	Fronte di salita della tensione	71
<u>CAPITOLO 5</u>	Approccio adottato	75
5.1	<i>Analisi manuale delle registrazioni</i>	75
5.2	<i>Collezione degli eventi</i>	78

5.3	<i>Curva di scarica normalizzata</i>	79
5.3.1	Aspetti generali	79
5.3.2	Tensione ad istanti prefissati	81
5.3.3	Tempo per raggiungere tensioni prefissate	82
5.4	<i>Analisi della ricarica</i>	85
<u>CAPITOLO 6</u>	Algoritmo	89
6.1	<i>Analisi automatizzata</i>	89
6.2	<i>Acquisizione dati</i>	91
6.2.1	Importazione	91
6.2.2	Script primo	92
6.2.3	Script secondo	93
6.2.4	Script terzo	95
6.3	<i>Separazione degli stati</i>	97
6.3.1	Script quarto	97
6.3.2	Script quinto	97
6.4	<i>Costruzione della curva di scarica normalizzata</i>	107
6.5	<i>Analisi della ricarica</i>	111
<u>CAPITOLO 7</u>	Sviluppi proposti	117
	Conclusioni	121
	Bibliografia	123
	Indice delle figure	127
	Indice delle tabelle	131
	Ringraziamenti	133

PREMESSA

Da quando è stata scoperta, l'elettricità si è radicata nel nostro mondo, tanto da diventare oramai indispensabile. Lo sviluppo tecnologico che abbiamo raggiunto è stato possibile e continuerà grazie ad essa. Il crescente numero di applicazioni mobili si riflette nella necessità di avere sistemi per immagazzinare energia elettrica adeguati.

La batteria recita un ruolo importante, in molti settori è la protagonista: dispositivi portatili; trazione elettrica; gruppi di continuità sono solo una parte delle applicazioni che ne fanno uso. Qualunque sia l'applicazione in cui è utilizzata, la batteria presenta problematiche simili.

Il tempo e l'utilizzo variano le proprietà: la batteria invecchia, la sua capacità diminuisce ed altre caratteristiche si degradano, inoltre un utilizzo improprio può ridurre la vita in modo drastico. Stimare il livello della carica è una delle prime problematiche con cui ci si scontra nella gestione dell'accumulatore.

Il presente testo è scritto in riferimento ad un accumulatore elettrochimico montato su una locomotiva elettrica largamente diffusa in Italia per il trasporto regionale. L'accumulatore è chiamato a coprire le operazioni essenziali richieste quando il pantografo è abbassato, ossia quando manca l'alimentazione principale.

La batteria ha un programma di manutenzione periodica che si vuole sostituire con una manutenzione da effettuare solo quando ce n'è bisogno. Tale approccio è denominato *Condition Based Maintenance* (CBM).

Lo scopo principale del CBM è di assicurarsi che la batteria sia in grado di garantire un corretto funzionamento ogni qual volta sia chiamata ad operare. Lo scopo secondario del CBM è di ridurre i costi di manutenzione e contemporaneamente allungare la vita della batteria.

La trattazione presenta le possibili soluzioni per l'implementazione del CBM e tenta un approccio percorribile, senza l'introduzione di componenti dedicate nel sistema locomotiva e non intrusivo.

Il Capitolo 1 fornisce una breve cronistoria dello stabilimento ospitante seguita da una descrizione della locomotiva su cui è montato l'accumulatore in oggetto.

Nel Capitolo 2 si scende nel dettaglio sul principio di funzionamento della cella NiCd ventilata che equipaggia la E464.

La manutenzione attualmente adottata nel ferroviario e il Condition Based Maintenance sono introdotti nel Capitolo 3.

Il Capitolo 4 raccoglie i test e le evidenze sperimentali ottenute in laboratorio nell'ottica di riprodurle a bordo locomotiva mediante telediagnostica.

Nel Capitolo 5 è esposto l'approccio seguito, motivando le scelte fatte ed evidenziando le limitazioni presenti.

Gli aspetti tecnici di un software scritto per automatizzare l'analisi dati, sono riportati nel Capitolo 6.

Il Capitolo 7 riassume le problematiche riscontrate, le annotazioni che potrebbero aiutare nel proseguo dello sviluppo ed i passi per una corretta implementazione del CBM.

LISTA DI SIMBOLI ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI

AT	Alta Tensione
BT	Bassa Tensione
BUR	Bordnetzumrichter, convertitore di rete di bordo
CB	Cassa Batterie
CBM	Condition-Based Maintenance
CBS	Carica Batterie Statico
CO	Controllo di Officina
E xxx	Classificazione delle Locomotive Trenitalia
GTO	Gate Turn Off, diodo controllato ad annullamento forzato di corrente
MT	Media Tensione
MCG	Mobile Communication Gateway
MVB	Multifunction Vehicle Bus (bus di veicolo)
PT100	Sonda di temperatura
QB	Quadro cabina di guida
QC	Quadro di media e bassa tensione in Comparto AT
QCB	Quadro Banco di manovra ausiliario
QE	Quadro di Elettronica centralina tachigrafica
QERS	Quadro di Elettronica e apparati di Ripetizione Segnali
RCC	Revisione Ciclica Carrelli
RO	Revisione Officina
RT	Revisione di Turno
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
TCN	Train Communication Network, composta da MVB più WTB
TIBB	Tecnomasio Italiano-Brown-Boveri
VCU	Vehicle Control Unit (unità di controllo del veicolo)
WTB	Wire Train Bus (bus di treno)

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 CENNI STORICI DELLA STRUTTURA OSPITANTE

Da oltre 100 anni Vado Ligure ospita un grande stabilimento ferroviario dove si producono elettromotrici, fondato nel 1905 dalla Società Italiana Westinghouse. In questo stabilimento lavorò Kálmán Kandó, padre delle locomotive trifase.

Lo stabilimento può essere apprezzato nell'immagine storica proposta, Fig. 1.1.



Fig. 1.1 – Lo stabilimento di Vado Ligure negli anni '10

Tra il 1908 e il 1920 dallo stabilimento ligure escono 186 esemplari della locomotiva trifase E550, e nel 1908 il primo locomotore interamente italiano.

Un esemplare della E550 è in Figura 1.2.

Nel 1919 il Tecnomasio Italiano-Brown-Boveri (TIBB) ¹ subentra alla Westinghouse nella gestione dello stabilimento di Vado Ligure.

Già nel 1928 era stata attivata l'elettificazione della linea Benevento-Foggia alimentata a 3 kV in corrente continua grazie ai raddrizzatori ai vapori di mercurio. Nonostante gli ottimi risultati ottenuti con la continua, la trazione trifase in Italia sopravvisse fino alla seconda metà degli anni '70. [1]

Sino all'adozione definitiva della trazione a corrente continua 3 kV, il Tecnomasio contribuì al miglioramento delle locomotive esistenti, ad esempio con la E551 (evoluzione della E550) e la progettazione di nuovi tipi E432 e E554.

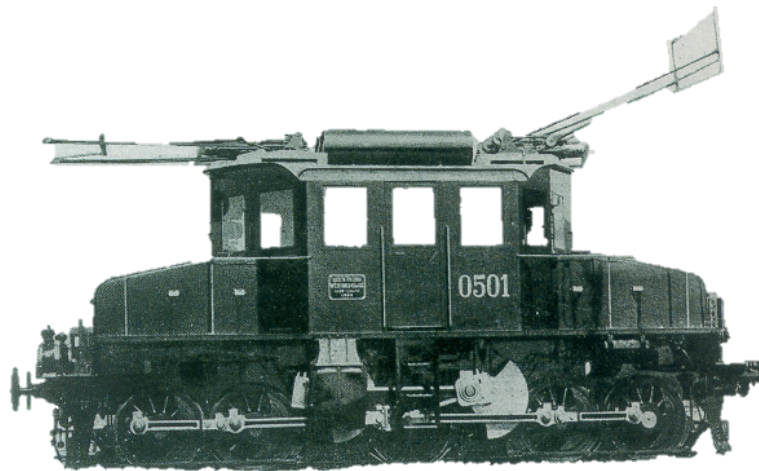


Fig. 1.2 - Locomotiva E550, "Gigante dei Giovi"²

¹ Tecnomasio è la più antica industria elettrotecnica italiana, fondata nel 1871. Nel 1903 il Tecnomasio fu acquisito da Brown Boveri ed il nome diventò Tecnomasio Italiano-Brown-Boveri (TIBB).

² La locomotiva E550, prima interamente costruita in Italia, è capace di trainare 190 t a 45 Km/h su pendenze del 35%, le locomotive a vapore del gruppo 470 potevano trainare sulla stessa pendenza 170 t a 25 Km/h. Queste performance unite all'esercizio nella linea del valico dei Giovi le fecero guadagnare l'appellativo "gigante dei Giovi".

Il Tecnomasio produsse a Vado Ligure quattro locomotive prototipo E625, capostipite delle locomotive a corrente continua italiane. Da quelle E625 ebbero origine, nel 1930, le E626, locomotiva prodotta in più di 400 unità, alcune rimaste in esercizio per oltre sessanta anni.

Per effetto delle devastazioni belliche, per mancanza di un piano di ricostruzione volto ad unificare il sistema ferroviario ed anche per i buoni esiti della sperimentazione del sistema alternato monofase all'estero³, il sistema di trazione a corrente continua tardò a conquistare la penisola.

Negli anni '70 si iniziano a progettare le prime locomotive veloci E444 (200 km/h), E656 (150 km/h) in linea di produzione dal 1976.

Il Tecnomasio introdusse nella locomotive E444.005, il controllo della corrente mediante chopper. L'esito positivo dell'esperimento permise l'abbandono dei reostati nella regolazione della trazione. La E633 dotata di chopper fu la prima locomotiva dotata di chopper ad entrare in servizio, nel 1980. Il chopper migliorò l'aderenza ma ulteriori vantaggi furono introdotti a partire dal 1983 con l'adozione di un azionamento con motore asincrono trifase alimentato mediante inverter, sistema maturato nel 1988 sulla E652. [2]

Nel 1999 vide luce il primo modello della locomotiva attualmente in linea di produzione nello stabilimento di Vado Ligure, la E464.

L'ultimo cambio di denominazione avvenne il 1° maggio 2001, quando, a seguito dell'acquisizione della società da parte della canadese Bombardier, divenne Bombardier Transportation Italy.

Una recente vista dello stabilimento, Fig. 1.3.

³ Francia, Germania, Giappone, Regno Unito, Svezia, Unione Sovietica, Cecoslovacchia, Finlandia ecc.



Fig. 1.3 – Lo stabilimento di Vado Ligure negli anni '00

Cronistoria dello stabilimento:

- 1919 il Tecnomasio Italiano-Brown-Boveri¹ subentra alla Westinghouse nella gestione dello stabilimento di Vado Ligure.
- 1988 fusione tra Asea e Tecnomasio, il nome dell'azienda cambia in ABB Tecnomasio.
- 1996 ABB Tecnomasio diventa ABB-Daimler Benz Transportation-Adtranz Italy
- 1999 ABB vende il 50% delle azioni Adtranz alla DaimlerChrysler. L'azienda diventa Daimler-Chrysler Rail Systems (Italia) S.p.a.
- 2001 confluenza per acquisizione al gruppo Bombardier con la nascita di Bombardier Transportation Italy

Oggi nell'impianto di Vado Ligure lavorano 580 dipendenti circa e si producono elettromotrici per il trasporto regionale passeggeri E464 e locomotive per trasporto merci della categoria TRAXX modello DC.

Il 23 settembre 2011 la regione Liguria ha varato la manovra di ampliamento dello stabilimento. Il progetto prevede la costruzione di un terzo capannone in collegamento diretto con la rete ferroviaria idoneo ad ospitare treni lunghi quali il nuovo Zefiro. [3]

1.2 LOCOMOTIVA E464

1.2.1 DESCRIZIONE GENERALE

La locomotiva con una massa di 72 t, classificata come locomotiva leggera è realizzata principalmente per l'effettuazione di treni interregionali. Essa è costituita da un'unica cassa a fiancate portanti dotata di una testata posteriore piatta in cui si trovano una porta intercomunicante di servizio per l'accesso alle carrozze e un bagagliaio. Nel lato anteriore si ha una testata aerodinamica con cabina di guida.

Un corridoio percorre tutta la locomotiva, consente l'accesso alle porte scorrevoli lungo le fiancate ed alla sala macchine.

Nella parte posteriore è presente anche un piccolo banco ausiliario per l'effettuazione delle manovre, dotato di tutti gli organi di comando e controllo. La visibilità nel banco ausiliario è assicurata da un finestrino fisso dotato di tergil cristalli posto sulla testata piana e da un finestrino laterale di tipo semiaperto a scorrimento. Infine è ivi presente anche la botola di accesso all'imperiale⁴.

La cassa poggia su due carrelli a due assi mediante sospensioni primarie e secondarie realizzate con molle a elica. Ogni asse è azionato da un motore asincrono trifase a doppia stella con rotore a gabbia. I motori sono tutti alimentati, a frequenza e tensione variabile, da un unico sistema di conversione costituito da un filtro rete d'ingresso e dal convertitore di trazione. Dello stesso sistema di conversione fa parte anche il chopper di frenatura.

L'alloggiamento per la batteria e per i caricabatteria è posizionato in un vano posto sotto tra i due carrelli sotto la cassa. Si veda il riferimento 1 in Fig. 1.4.

L'alimentazione è prevista da linea a 3000 V a corrente continua, ma il funzionamento è assicurato, a prestazioni ridotte, anche da rete a 1500 V a

⁴ L'imperiale è la parte superiore della cassa di un rotabile ferroviario.

corrente continua con identica configurazione di locomotiva, senza quindi necessità di commutazioni nell'azionamento. La frenatura elettrica è in grado di operare a recupero, su reostato o mista.

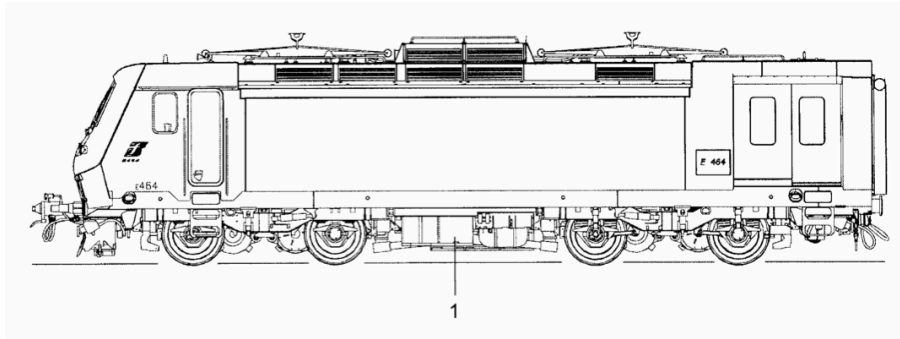


Fig. 1.4 – Vista laterale della locomotiva e posizione del vano batteria [4]

Equipaggiamento di trazione/frenatura e sistema dei servizi ausiliari sono realizzati con criteri di modularità e ridondanza. In particolare in caso d'avaria è possibile l'esclusione di un convertitore, avendo ancora a disposizione il 50% della potenza, sia oraria che continuativa; i convertitori dei servizi ausiliari offrono una completa ridondanza.

Il raffreddamento, sia del convertitore principale che di quelli ausiliari è realizzato tramite una miscela di acqua deionizzata e glicole etilenico, questo in funzione anticongelante.

Il controllo di veicolo si basa su un sistema multiprocessore integrato ed uniforme. La trasmissione dei segnali di macchina avviene mediante un BUS di comunicazione ridondante, come pure ridondante è l'elettronica di controllo.

La locomotiva è dotata di sistemi diagnostici e di telecomando in multiplo. Inoltre è possibile telecomandare la locomotiva da carrozza semipilota⁵. [5]

⁵ La semipilota è una carrozza passeggeri dotata di una cabina per il comando della motrice. Consente il regresso del treno senza effettuare alcuna manovra, questa infatti può realizzare la testa del treno azionando a distanza la motrice posta in coda.

Il progetto iniziale risale al 1994, nasce dalla richiesta di Trenitalia fatta ad ABB Trazione di creare una nuova classe di locomotori economici e modulari che, dove possibile, utilizzassero soluzioni già disponibili e testate sulle E412 e sui prototipi. I locomotori di questa nuova classe condividono gli stessi moduli, dai quali sarebbero potute esser realizzate configurazioni a 4 assi per il trasporto regionale (E453 e E454) ed a 6 assi per il trasporto merci (E665 e E666).

Le versioni di locomotive destinate al trasporto merci non videro mai luce poiché potevano essere sostituite con una versione potenziata della E632.

Le versioni destinate al trasporto passeggeri vennero consegnate in numero limitato perché sovradimensionate, avevano infatti a disposizione 4,5 MW di potenza quando sarebbero serviti soli 2,5 MW. Nasce quindi la E464 mossa da motori asincroni alimentati da inverter, per semplicità e costo di progetto l'ABB Trazione si aggiudica la gara e viene assegnata la prima commessa di 50 locomotive alla neonata AdTranz Italia.

Dal 1999 nello stabilimento di Vado Ligure le E464 hanno continuato ed esser prodotte e grazie all'ultima commessa di Trenitalia, si raggiungerà la quota di 688 esemplari. La produzione è continuata anche a seguito dell'acquisizione di Bombardier Transportation Italy avvenuta nel 2001.

Åke Wennberg, Presidente della Divisione Locomotives and Equipment di Bombardier Transportation, in occasione del centenario dello stabilimento, ha dichiarato: *"Grazie a queste ulteriori 50 locomotive E464, Trenitalia gestirà una delle più grandi flotte omogenee in Europa, diventando così uno dei primi operatori a beneficiare della considerevole riduzione dei costi operativi e di manutenzione delle E464"*. [3]

Le specifiche, che contraddistinguono la E464, sono riportate nella Tabella 1.1.

Tab. 1.1 – Specifiche principali della locomotiva E464 [7]

Tensione nominale	3 kV DC
Tensione ammessa	2 – 4 kV DC (1 – 2 kV DC a tensione ridotta)
Massa reale	72 t
Rodiggio	Bo-Bo
Rapporto trasmissione	1/5
Lunghezza	15750 mm
Velocità massima	160 km/h
Sforzo di trazione	200 kN (200kN a tensione ridotta) allo spunto 180 kN (190kN a tensione ridotta) tra 28 e 60 km/h
Potenza oraria	3,5 MW (1,75 MW a tensione ridotta)
Potenza continuativa	3 MW (1,5 MW a tensione ridotta)

I Quattro motori sono alimentati da un convertitore a GTO (raffreddato a liquido) composto da due inverter collegati in serie, ognuno dei quali alimenta una stella dei motori. Questo particolare schema consente di eliminare il primo stadio di conversione, generalmente un chopper stabilizzatore. Stessa configurazione monostadio è adottata sugli ETR500 e sulle E412. La funzione stabilizzatrice che sarebbe stata assolta dal primo stadio può essere omessa per la presenza della doppia stella nei motori. In condizioni normali di funzionamento entrambi gli inverter concorrono ad alimentare i motori.

In caso di avaria di un inverter, la locomotiva può comunque operare ma a potenza ridotta. L'inverter funzionante alimenta i motori, mentre l'altro può essere bypassato inserendo il chopper di frenatura. in questo modo si realizza un partitore di tensione evitando così l'alimentazione diretta dell'inverter con la tensione di linea.

Le prestazioni in caso di avaria di un inverter sono ridotte al 50 % ma con tutti i motori attivi si raggiunge comunque il massimo sforzo di trazione. [6]

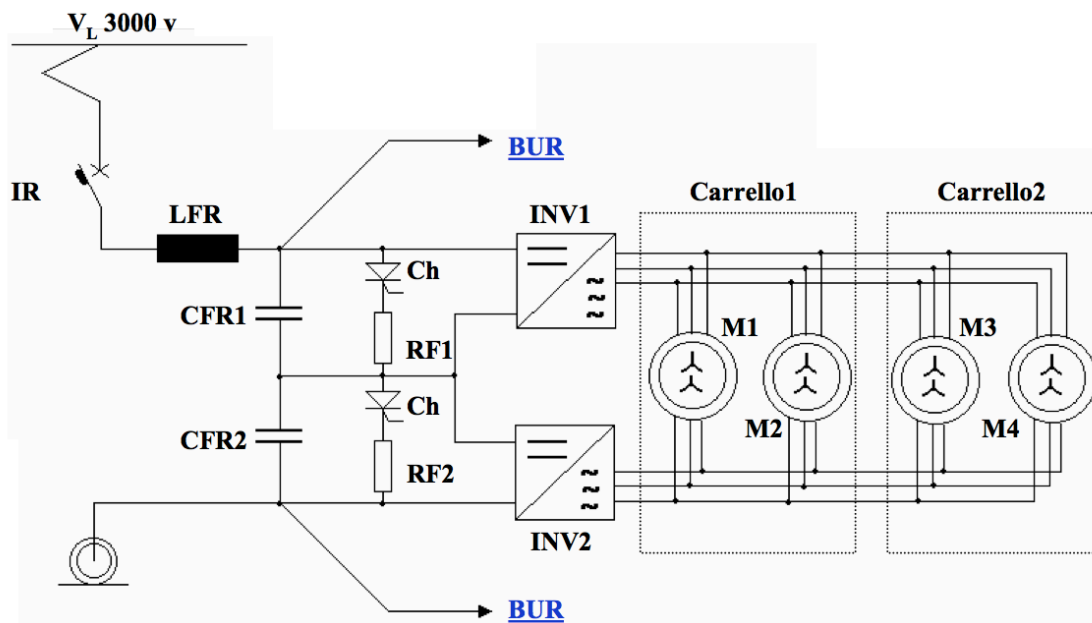


Fig. 1.5 – Circuito di potenza, schema di principio [7]

I servizi ausiliari sono alimentati da due convertitori statici a doppio stadio di conversione denominati BUR (bordnetzumrichter, convertitore di rete di bordo) con tensione variabile fino a valori massimi di 450 V e 60 Hz con chopper di ingresso. Uno alimenta il sistema di raffreddamento dei motori, l'altro alimenta motocompressori, motoventilatore, carica delle batterie, climatizzatore della cabina e reostato di frenatura. Lo schema di principio dei servizi ausiliari collegati ai BUR è mostrato in Fig. 1.6.

Tutta l'elettronica di potenza è composta da GTO raffreddati da una miscela di acqua deionizzata e anticongelante. Il rubinetto del freno è di tipo elettronico a 4 posizioni che gestisce l'intero sistema di frenatura. Su ogni asse sono presenti due dischi autoventilanti che intervengono sia per la frenatura di stazionamento (a molla) che per quella pneumatica (per velocità inferiori ai 30 km/h).

La frenatura elettrica quando possibile è a recupero, altrimenti reostatica. Quando il tratto di linea non è ricettivo⁶ la frenatura elettrica può essere solo reostatica, realizzata con due reostati alimentati da altrettanti chopper di frenatura a GTO.

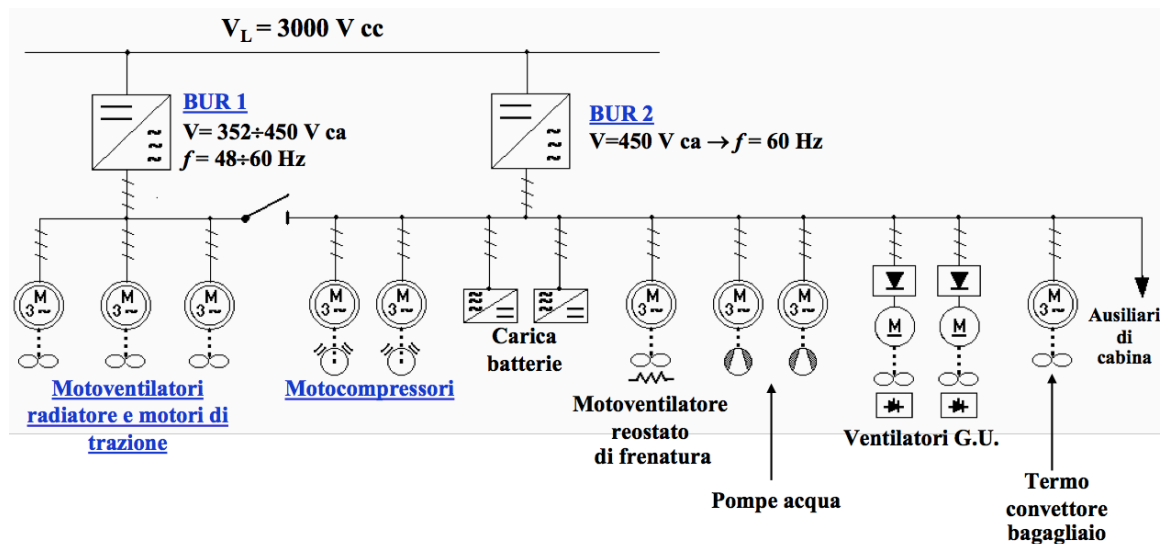


Fig. 1.6 - Carichi alimentati dai BUR, schema di principio

La motrice e le possibili avarie sono gestite elettronicamente mediante un articolato sistema ridondato.

Le E464 sono dotate di un sistema per il comando/telecomando multiplo denominato TCN⁷ composto da MVB o da più WTB, con cavo a 78 poli per il

⁶ Un tratto di linea è considerato ricettivo quando, iniettando corrente la tensione non sale eccessivamente. In fase di frenatura ci sarà un tentativo per testare la ricettività della linea, qualora nessuna locomotiva funga da carico la tensione in quel tratto subirà un repentino innalzamento, in tal caso la frenatura elettrica può proseguire solo nella modalità reostatica.

⁷ Train Communication Network (TCN), combinazione gerarchica di due bus di trasmissione. È costituito dal Multifunction Vehicle Bus (MVB) e dal Wire Train Bus (WTB) per connettere l'MVB con il sistema di controllo del treno. I componenti del TCN sono stati standardizzati nella norma IEC 61375.

comando o con un particolare cavo 13 poli per il telecomando. Con il cavo 78 poli (tipologia di cavo molto diffusa) si possono realizzare composizioni fino a 4 locomotive in comando multiplo⁸, con il cavo 13 poli si può realizzare la configurazione più frequentemente utilizzata cioè il comando da carrozza pilota.

Le possibilità di utilizzo offerte da questo sistema sono molteplici:

- Locomotiva singola: unica locomotiva ubicata in testa (v. Fig. 1.7);
- Master 78 Poli: locomotiva con banco di manovra abilitato accoppiata ad altra locomotiva telecomandata con cavo a 78 poli (v. Fig. 1.8);
- Slave 78 Poli: locomotiva telecomandata tramite cavo 78 poli dalla carrozza semipilota o dalla locomotiva master (v. Fig. 1.9);
- Master TCN: locomotiva master con telecomando tipo TCN 18 poli (v. Fig. 1.10);
- Slave TCN: locomotiva Slave con telecomando TCN 18 poli (v. Fig. 1.10);
- Router: (Slave 78 Poli – Master TCN) per l'accoppiamento con motrici più vecchie (v. Fig. 1.11).

⁸ Il comando multiplo consente di accoppiare più locomotori. [8]

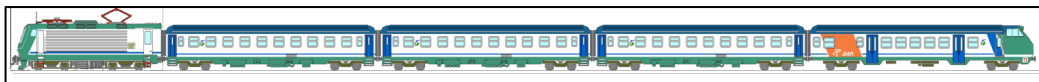


Fig. 1.7 - Composizione locomotiva singola (direzione sinistra), slave 78 poli o TCN (direzione destra)



Fig. 1.8 - Composizione master 78 poli o TCN (direzione sinistra), slave 78 poli o TCN (direzione destra)

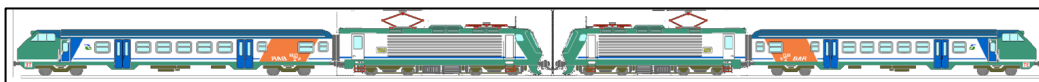


Fig. 1.9 - Composizione router slave 78 poli o TCN e slave 78 poli o TCN

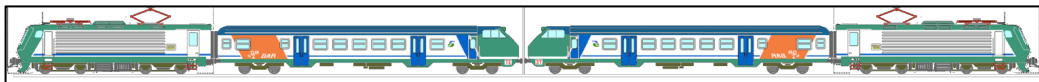


Fig. 1.10 - Configurazione master TCN e slave TCN (direzione sinistra), slave TCN e router slave 78 poli-master TCN (direzione destra)

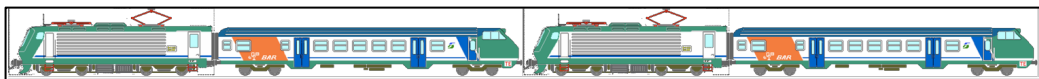


Fig. 1.11 - Configurazione master TCN e slave TCN (direzione sinistra), slave TCN e router slave 78 poli-master TCN (direzione destra)

1.2.2 CIRCUITI DI BASSA TENSIONE

I circuiti in bassa tensione sono alimentati in corrente continua ad una tensione di 24V nominali. L'alimentazione è garantita dai caricabatterie e dalle batterie di bordo. Questi sono disposti nel sottocassa come mostrato in Fig. 1.12.

I caricabatterie sono normalmente alimentati dalla tensione continua intermedia di 720 V fornita dai due CSA e l'alimentazione ai circuiti BT viene distribuita mediante dispositivi di controllo e protezione (interruttori automatici, contattori, relè, trasduttori).

I principali carichi BT sono:

- Batterie;
- Banco di manovra e suoi interfacciamenti;
- Banco di manovra ausiliario (QCB) e suoi interfacciamenti;
- Motocompressore 1° alzata pantografo;
- Apparecchiature BT nel quadro QB;
- Apparecchiature BT nel quadro QC;
- Quadro QE (centralina tachigrafica, sistema annuncio passeggeri);
- Quadro QERS (centralina ripetizione segnali, elettronica di bordo);
- Impianto di illuminazione;
- Impianto antincendio;
- Sistemi di telecomando a 78 poli e 18 poli;
- Circuiti tergicristallo, lavavetro e comando porte;
- Circuiti BT del convertitore principale;
- Circuiti BT del convertitore ausiliario.

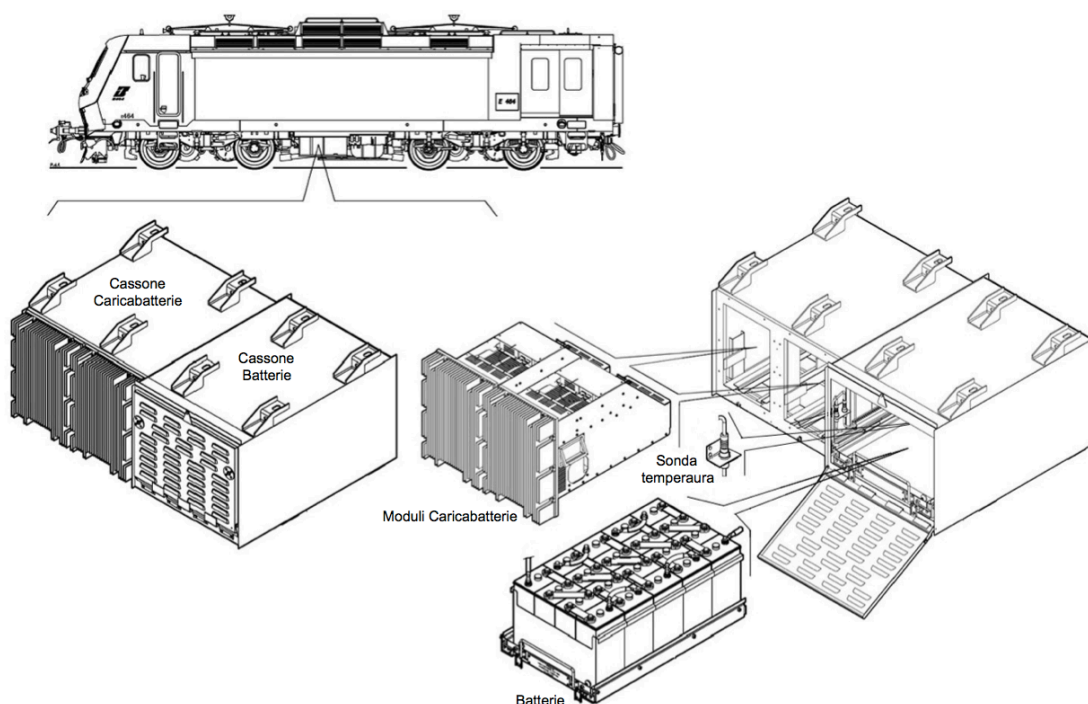


Fig. 1.12 – Disposizione dei moduli caricabatterie e batteria nel sottocassa.

Il *caricabatterie statico* (CBS) preleva l'alimentazione dal +BUS 720 V del CSA (oppure dalla presa esterna a 380 Vca, solo CBS1) e fornisce in uscita la tensione nominale a 24 Vcc per la ricarica delle batterie di bordo e per l'alimentazione delle utenze a 24 Vcc.

Le principali caratteristiche elettriche sono riportare di seguito, Tab. 1.2.

Tab. 1.2 – Principali caratteristiche elettriche dei CBS

Tensione di uscita	29,8 V ÷ 32,8 V $\pm 2\%$
Corrente totale massima	280 A $\pm 5\%$
Corrente massima in batteria	70 A $\pm 5\%$
Rigidità dielettrica fra ingresso e BT collegata a massa	2500 Vca – 50 Hz – 60 s
Rigidità dielettrica fra BT ed MT collegata a massa	750 Vca – 50 Hz – 60 s

L'elettronica di controllo del CBS riceve dalla logica di veicolo il valore di temperatura esterna in base al quale viene impostata la tensione di fine carica

in modo da limitare il consumo del liquido elettrolita. La relazione tra la tensione di fine carica e la temperatura è lineare, si veda Fig. 1.13.

Nel caso in cui il segnale di temperatura fosse assente, sarebbe fornita la tensione a 20 °C. Per tale temperatura, la tensione di fine carica si attesta al valore di 31 V.

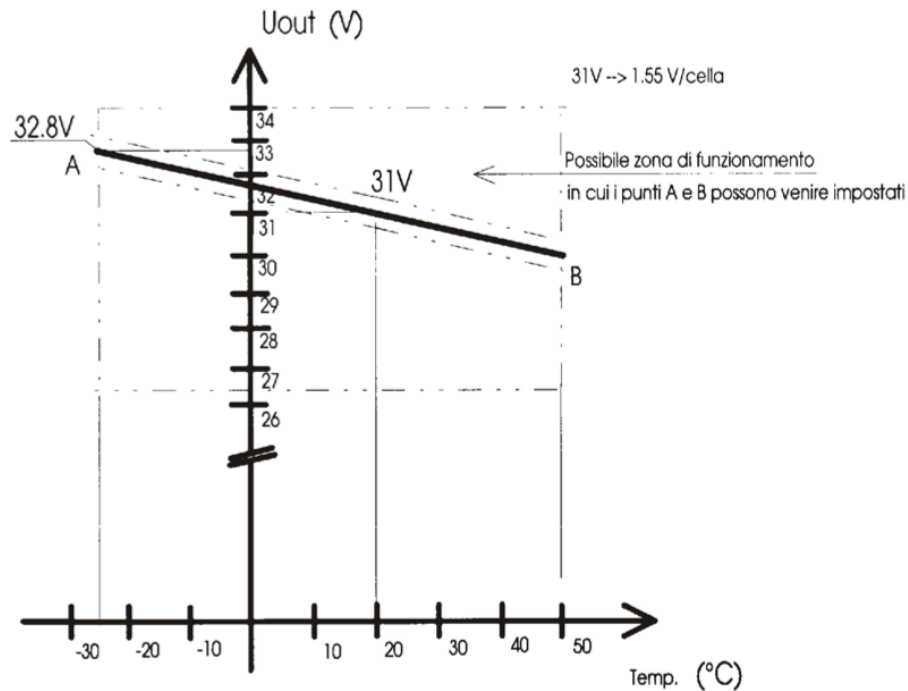
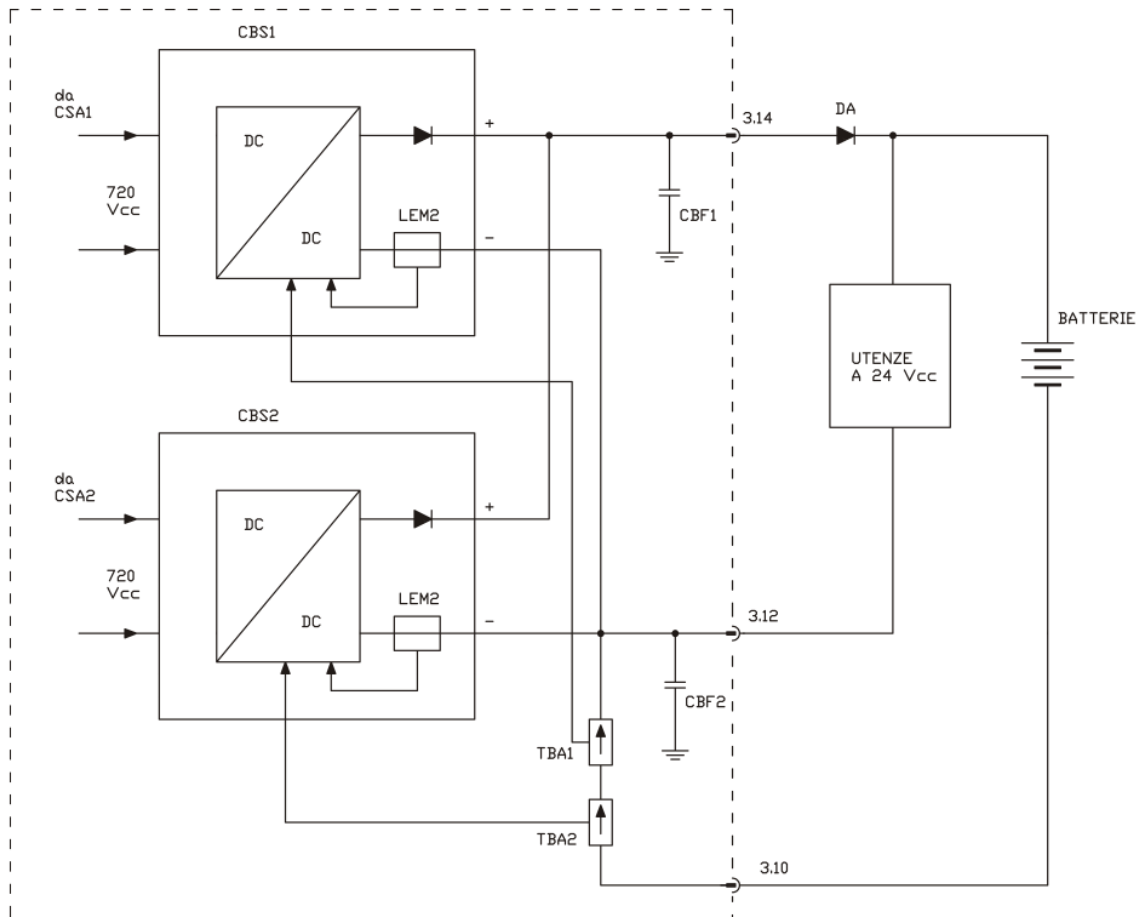


Fig. 1.13 - Tensione d'uscita del CBS in funzione della temperatura [9]

Il CSA è equipaggiato con due caricabatterie statici, ciascuno alimentato in modo indipendente dai due BUS a 720 V. Le uscite dei CBS sono in parallelo e disaccoppiate tramite diodi, quest'accorgimento previene che, in caso di guasto di un CBS, si abbia un pericoloso flusso di energia dalla batteria al CBS stesso.

Uno schema di principio del collegamento tra batteria, CBS, CSA e del bus a 720 Volt, può essere trovato in Fig. 1.14.

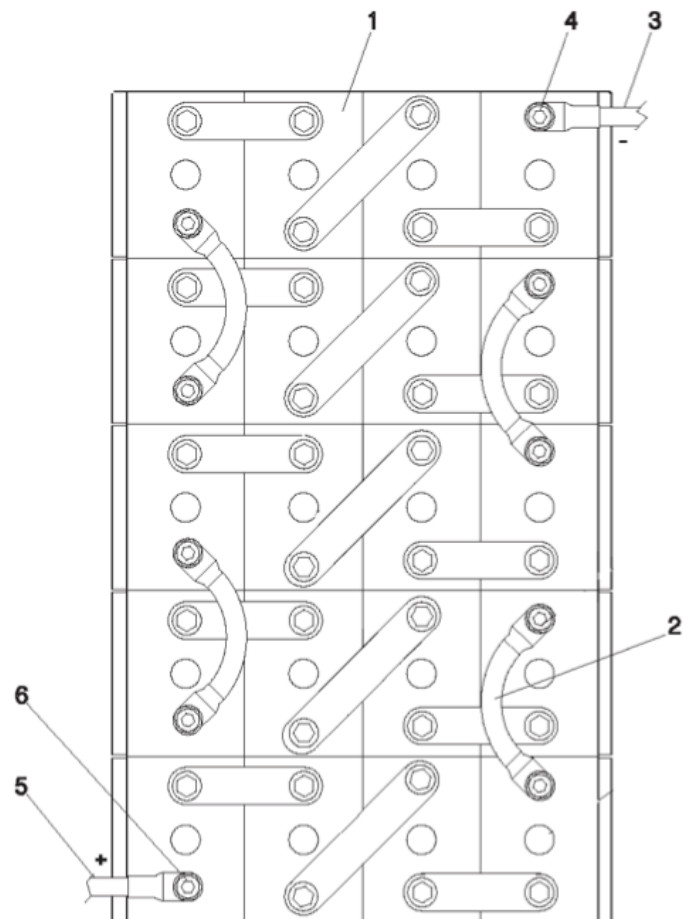


Le batterie possono essere caricate dal CBS abilitato dalla Logica di Veicolo, questa consente il funzionamento di un CBS alla volta. La corrente totale erogata è misurata, per ciascun CBS, con il trasduttore LEM2.

I condensatori CBF1 e CBF2 collegati sui morsetti di potenza hanno lo scopo di ridurre i disturbi condotti sulle uscite BT di potenza.

È inoltre prevista una protezione da sovraccarico che interviene al superamento di 300 A erogati dalla batteria. L'interruttore di protezione è omesso nello schema di principio di Fig. 1.14.

Nella batteria, i singoli elementi sono collegati in serie e disposti secondo la sequenza mostrata in Fig. 1.15.



- 1. Elemento
- 2. Connessione flessibile (quattro unità)
- 3. Cavo negativo
- 4. Bullone di fissaggio negativo
- 5. Cavo positivo
- 6. Bullone di fissaggio positivo

Fig. 1.15 - Collegamento tra le celle che compongono la batteria [9]

CAPITOLO 2

BATTERIA

2.1 CENNI SULLA BATTERIA NiCD VENTILATA

Nel 1899, ad un secolo dalla scoperta della pila di Volta, lo svedese Waldmar Jungner diede vita alla pila Nichel Cadmio. Composta di Nichel all'elettrodo positivo, Cadmio al negativo e da elettrolita alcalino.

La pila Nichel-Cadmio fu la seconda batteria ricaricabile ad essere inventata, la prima fu quella al Piombo-Acido scoperta nel 1859 dal fisico francese Gaston Planté. Inizialmente non furono comprese le potenzialità delle pile ricaricabili, poiché per la ricarica si dovevano usare altre pile, l'invenzione della dinamo, infatti, risale al 1869.

Nel 1901, Edison sostituì il cadmio con il ferro, nacque così l'accumulatore NiFe. Nonostante la sostituzione di un elettrodo l'unica batteria di successo continuò ad essere quella al Piombo, più economica.

La situazione migliorò grazie a Schlecht e Ackermann che nel 1932 introdussero le piastre sinterizzate. Tale procedimento permise di realizzare elettrodi porosi grazie a pressioni elevate ma temperature inferiori al punto di fusione. Nonostante le prestazioni della batteria fossero migliorate nettamente, considerando la sua robustezza, l'interesse per l'accumulatore NiCd si riaccende.

Nel 1947 Neumann riuscì a sigillare la batteria NiCd realizzando la configurazione che l'ha portata alla notorietà.

L'evoluzione delle batterie prosegue grazie ai composti intermetallici come SmCo_5 e LaNi_5 che sono capaci di assorbire e rilasciare grandi quantità d'idrogeno. Si è notato che elettrodi così composti potevano realizzare un nuovo accumulatore elettrochimico. Negli anni seguenti gli elettrodi che formano

idruro si sono rivelati una valida alternativa al cadmio. Grazie alla non-tossicità degli elementi chimici ed alle buone proprietà elettriche, le batterie NiMH hanno trovato grande mercato a partire dagli anni '90.

La prima batteria non ricaricabile al litio comparso nei primi anni '70. I primi tentativi per sviluppare la batteria al litio ricaricabile vennero fatti negli anni '80 ma furono fallimentari per i problemi di sicurezza. I fallimenti erano dovuti all'instabilità del litio, soprattutto in fase di ricarica e fecero deviare le ricerche verso gli ioni di litio. Anche se la densità di energia è inferiore, la batteria agli ioni di litio si è rivelata più sicura e facile da gestire in fase di carica e scarica. Nel 1991 Sony commercializza la prima batteria Li-Ion.

L'evoluzione delle batterie non si è fermata, è in continuo fermento e sono state già individuate e commercializzate altre tipologie di accumulatori elettrolitici. [4]

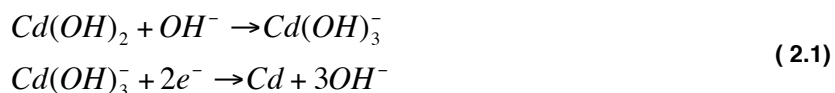
La batteria oggetto di questo studio non è molto diversa dall'idea di Schlecht e Ackermann e per quanto riguarda questa trattazione potremmo fermarci al 1932. Nonostante l'età, la batteria NiCd ventilata è oggi un buon compromesso tra peso, capacità, affidabilità, manutenzione e prospettiva di vita. Per questi motivi è adottata nell'aviazione, nel trasporto ferroviario, nei trasporti di massa, come gruppo di continuità nelle telecomunicazioni, per avviare gruppi di continuità a turbina, etc.

2.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

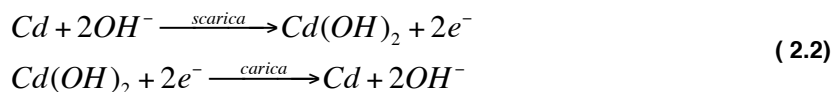
In una cella NiCd, la reazione di carica/scarica avviene all'elettrodo positivo (catodo) composto da idrossido nichelico (NiOOH), attraverso un meccanismo di trasferimento ionico dello stato solido omogeneo. Questo processo prevede l'impiego di elettroliti solidi che permettono la conducibilità ionica; l'elettrolita più comunemente utilizzato è sicuramente l'idrossido di potassio (KOH) che non viene consumato nel corso della reazione, pertanto la conducibilità elettrica rimane inalterata. In passato un'importante innovazione fu l'aggiunta di idrossido di Litio (LiOH) all'elettrolita per aumentare il tempo di vita delle batterie, in realtà si è scoperto che nella sua forma moderna la batteria NiCd è

già estremamente resistente per tanto questa pratica è stata abbandonata nella maggior parte delle applicazioni, ad eccezione di quelle che richiedono elevatissima affidabilità. Inoltre data la concentrazione costante di KOH, una piccola variazione della temperatura o effetto crioscopico non varia le prestazioni della cella.

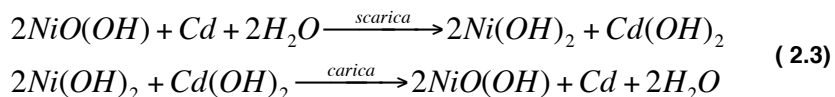
Il meccanismo che sta alla base di queste batterie è caratterizzato principalmente da una migrazione di protoni tra l'idrossido nicheloso (materiale attivo di scarica) e l'idrossido nichelico (materiale attivo di carica). Mentre all'elettrodo negativo (anodo), composto da Cd metallico, l'idrossido di Cd (materiale attivo di scarica) viene convertito in Cd metallico (materiale attivo di carica) tramite una reazione che coinvolge la formazione di un complesso intermedio, come descritto di seguito (Equazione 2.1), ad un potenziale standard di -0.81 V vs SHE⁹:



L'equazione completa all'elettrodo negativo risulta pertanto (Equazione 2.2):



Ne segue che la reazione complessiva della cella risulta essere (Equazione 2.3):



Con un potenziale standard complessivo di +1.80 V vs SHE.⁹

Per assicurare un buon funzionamento della cella NiCd a diverse condizioni operative, essa è stata progettata per essere limitata positivamente. Questo

⁹ Potenziale riferito all'elettrodo a calomelano saturo, Saturated Calomel Electrode (SCE).

assicura che, in condizioni standard, la produzione di O_2 , il quale diffonde verso l'anodo, sia controllata e che esso vada a reagire con il Cd metallico per formare l'idrossido di Cd secondo la seguente reazione:



L'idrossido di cadmio così formato si converte nuovamente in Cd metallico secondo la reazione 2.3 durante la fase di carica.

Il rapporto tra la capacità positiva e quella negativa varia generalmente tra 1.5 e 2. La fase di scarica ha tipicamente una riserva compresa tra il 15-20% di capacità positiva, e la fase di carica ha una riserva o protezione di sovraccarico circa del 30% di capacità positiva.

Il sovraccaricamento ha due possibili conseguenze: se si sovraccarica l'anodo si produce idrogeno, mentre se si sovraccarica il catodo si produce ossigeno, come espresso in precedenza, per questo motivo l'anodo è sempre progettato per avere una capacità più alta del catodo, per evitare rilascio di idrogeno, che risulterebbe alquanto pericoloso.

Un'immagine che riassume il principio di funzionamento descritto, per la cella NiCd, è riportata in Fig. 2.1.

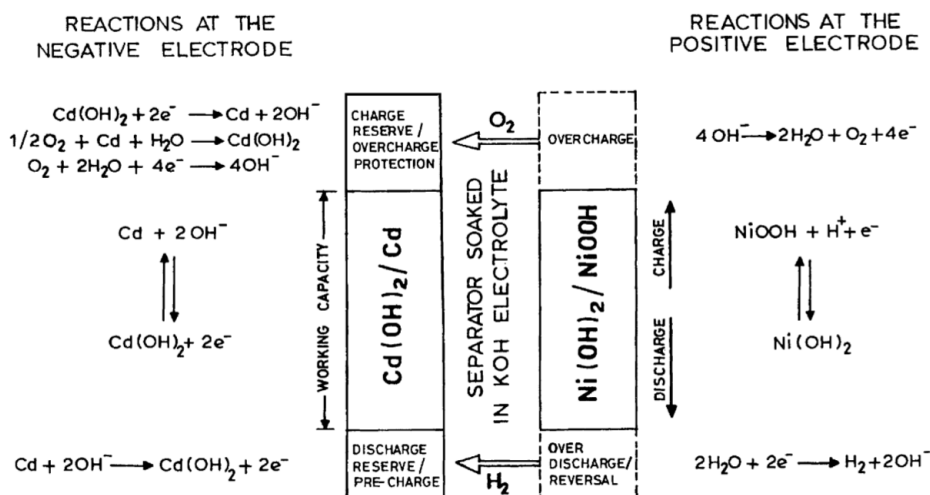


Fig. 2.1 – Principio di funzionamento di una cella Ni-Cd Sealed Type [7]

2.3 PERFORMANCE E COMPORTAMENTO

Le caratteristiche di una cella dipendono da molteplici fattori. Le differenze principali nel comportamento delle celle possono essere attribuite a:

- tipologia delle celle (ventilate o sigillate);
- tipologia di costruzione;
- processo di produzione (es. sinterizzazione);
- temperatura di esercizio;
- capacità di carica/scarica;
- stato precedente della cella;
- età delle celle.

Ogni batteria è costituita dall'insieme di più celle, ogni cella è però diversa l'una dall'altra anche in una stessa batteria. Sebbene i primi tre punti siano sicuramente i medesimi, la batteria può avere gli ultimi quattro punti differenti.

Per le inevitabili differenze tra la capacità delle celle in serie che compongono una batteria può capitare che alcune celle vadano ad operare in condizioni di scarica profonda, di conseguenza si ha la formazione di idrogeno all'elettrodo positivo. Ripetendo cicli completi sulla batteria le celle più deboli subiscono ripetute scariche profonde, che nelle batterie sigillate, di volta in volta fanno innalzare la pressione interna fino a portare la valvola di sicurezza allo sfogo mentre nelle batterie di tipo ventilato portano all'evaporazione dell'elettrolita. Le celle deboli sono più soggette a quanto detto poiché presentano una capacità ridotta, di conseguenza, se esercite in serie ad altre celle, esauriscono prima la loro carica in fase di scarica e si sovraccaricano in fase di ricarica.

Durante la fase di carica si nota la differenza tra la tipologia di cella sigillata e ventilata. Il comportamento della cella ventilata è confrontato col comportamento della cella sigillata, Fig. 2.2 evidenzia gli andamenti tipici della tensione di carica per correnti pari a $C/10$ a temperatura ambientale su celle sigillate e ventilate.

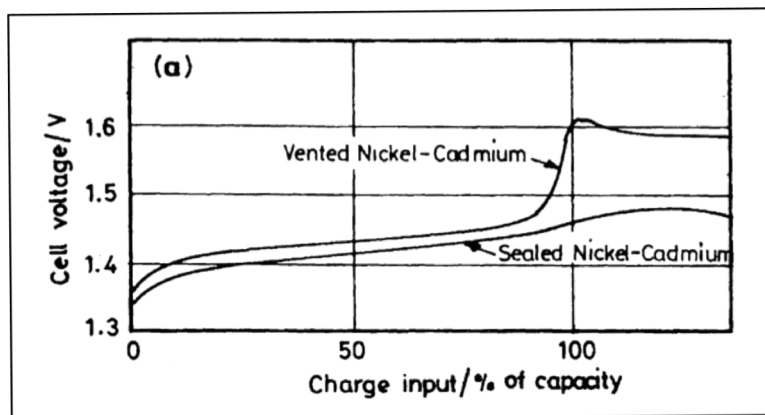


Fig. 2.2 – Tensione di carica per corrente pari a C/10 in diverse tipologie di batteria

Si noti come nella cella ventilata l'andamento della tensione subisca un marcato aumento della pendenza in prossimità della capacità nominale, Fig. 2.2.

Il comportamento della cella dipende anche dalla temperatura, tale effetto può essere osservato sia in fase di scarica che in fase di ricarica.

Alcuni produttori di batterie ventilate consigliano di variare la tensione di fine carica per compensare l'effetto della temperatura. Ad esempio, per una batteria ventilata destinata all'aviazione prodotta dalla MarathonNorco Aerospace, è disponibile un grafico della tensione di fine carica raccomandata, si veda Fig. 2.3. La variazione della tensione di fine carica è realizzata dal CBS secondo quanto illustrato in Fig. 1.13.

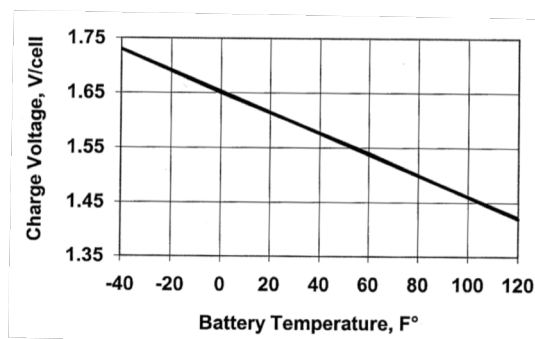


Fig. 2.3 – Massima tensione di ricarica raccomandate nella fase “tensione costante” in funzione della temperatura

Per quanto concerne la scarica, riducendo la temperatura si riduce anche la tensione sostenuta dalla batteria. A tal proposito si osservi Fig. 2.4.

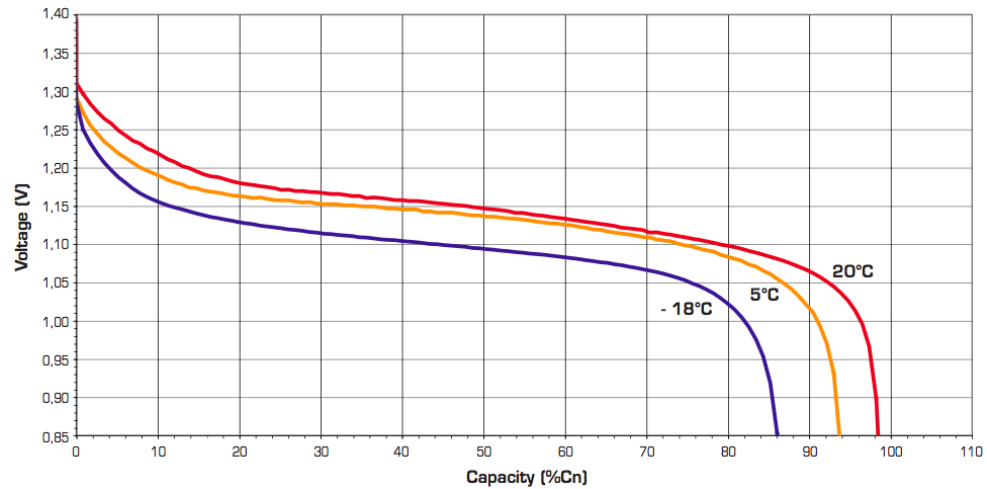


Fig. 2.4 – Curva di scarica a corrente nominale a differenti temperature per una batteria Saft modello MRX [10]

La resa della batteria è funzione della corrente di scarica e cala all'aumentare della corrente erogata, si veda a tal proposito Fig. 2.5.

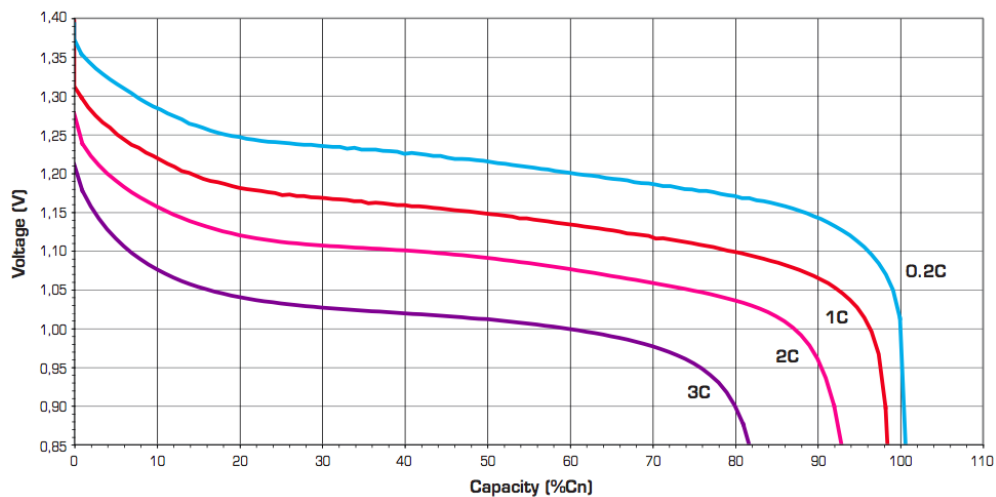


Fig. 2.5 – Capacità resa dalla batteria al variare della corrente erogata a 20°C per una batteria Saft modello MRX [10]

2.4 FATTORI DI INVECCHIAMENTO

Il numero di cicli degrada le prestazioni della batteria, l'andamento è del tipo mostrato in Fig. 2.6 ma occorre tenere presente che i modelli di vita differiscono notevolmente con le tipologie di batteria, i processi costruttivi e la manutenzione (dove prevista).

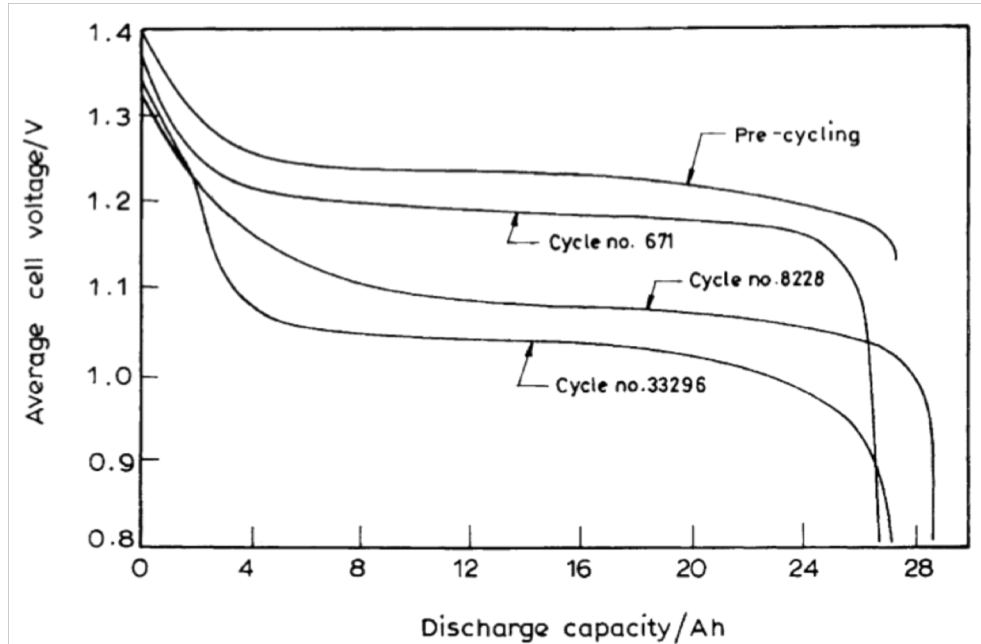


Fig. 2.6 - Tipiche curve di scarica a diverso numero di cicli per batteria Ni-Cd sigillata [11]

2.5 USO DELLA BATTERIA NELLA LOCOMOTIVA

La batteria alimenta due tipologie di carichi: le normali utenze BT ed i carichi privilegiati (es. illuminazione di emergenza) per i quali deve essere garantita un'autonomia minima.

È stato eseguito un monitoraggio della batteria in condizioni di normale utilizzo e sono disponibili registrazioni dell'evoluzione delle grandezze elettriche nel tempo. In condizione di normale esercizio sono stati analizzati i cicli di lavoro che possono presentarsi durante l'utilizzo quotidiano della locomotiva.

Per la maggior parte del tempo, la batteria è inutilizzata e mantenuta carica in tampone¹⁰. Durante questa fase, osservando la tensione di batteria si ottiene un andamento che ricalca la tensione imposta dal CBS. Nel Capitolo 1, è mostrato come la tensione imposta dal CBS sia funzione della temperatura nel sottocassa (v. Capitolo 1, Fig. 1.13).

Una registrazione delle grandezze monitorate, durante la fase di carica in tampone, è mostrata in Fig. 2.7. Nell'arco di tutta la registrazione, della durata di mezz'ora, si osserva che la tensione non resta costante ma subisce delle fluttuazioni.

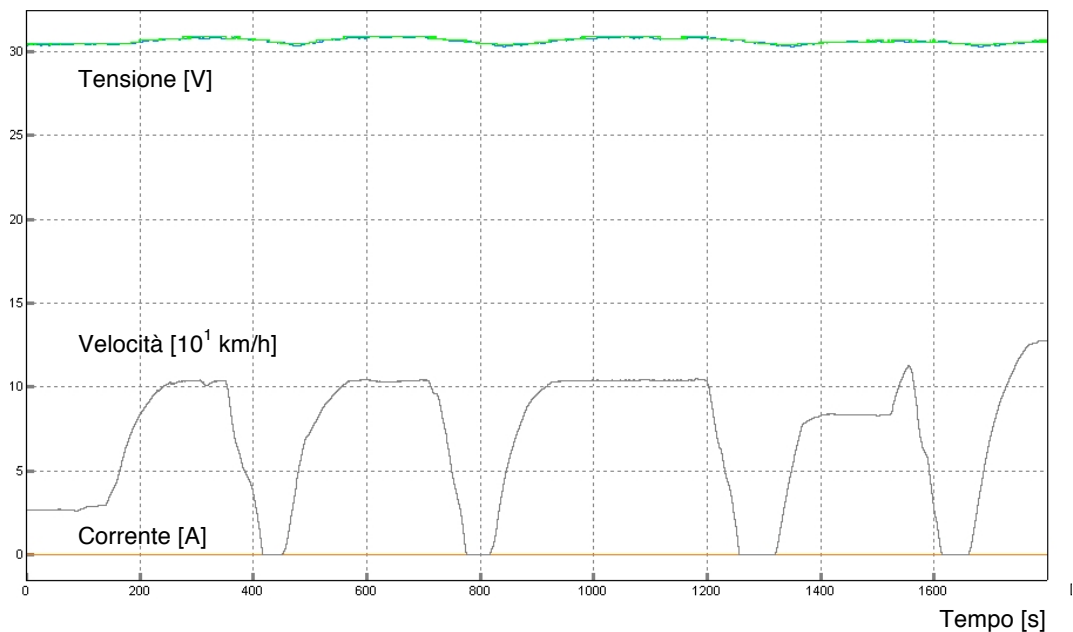


Fig. 2.7 – Andamento delle grandezze elettriche (tensione CBS e tensione batteria sovrapposte nella parte superiore del grafico) e corrente (nulla) sovrapposte al profilo di velocità (in scala 1/10) su E 464 508 in servizio il 2 Luglio 2011, registrazione di 1800 secondi

¹⁰ Il termine “carica in tampone” si riferisce allo stato in cui la batteria è mantenuta ad una tensione di valore imposto dal caricabatteria e pari al valore stabilito in Fig. 1.13. Durante la carica in tampone la corrente che riceve la batteria è inferiore rispetto alla corrente di carica nominale e nel tempo tende ad estinguersi.

Sovrapponendo alla tensione di batteria, l'andamento della velocità della locomotiva, si osserva una corrispondenza tra i due andamenti (v. Fig. 2.7). Sembra che la tensione di batteria vari con la velocità. In realtà si ha l'ambiente sottocassa a temperatura maggiore della temperatura ambiente, con la locomotiva in marcia tale ambiente si raffredda¹¹. La sonda PT100 presente nel sottocassa percepisce una temperatura inferiore quando la locomotiva è in movimento, di conseguenza il CBS imposta una tensione di fine carica maggiore, secondo quanto già illustrato (v. Capitolo 1, Fig. 1.13).

Quando utilizzata, la batteria compie dei cicli parziali di scarica e successiva ricarica. Cicli completi non sono mai stati registrati¹².

La profondità tipica del ciclo compiuto è modesta, spesso inferiore al punto percentuale del ciclo completo. A tal proposito è possibile esaminare un andamento tipico, riportato in Fig. 2.8, dal quale si osserva la corrente erogata dalla batteria (tratto prevalentemente nullo che scende a -58 ampere durante la fase di scarica) e la tensione (tratto prevalentemente a 31 volt che si abbassa durante la scarica). Il tempo di utilizzo è di circa 50 secondi cui segue un simile tempo di ricarica. Le grandezze elettriche sono sovrapposte alla velocità della locomotiva che è nulla in tutti i casi di utilizzo registrati.

Per avere un'idea dell'entità della scarica è sufficiente valutare con la relazione (2.5) l'energia erogata dalla batteria. A tal proposito si considerano corrente e tensione costanti rispettivamente a -58 ampere e 24 volt.

¹¹ È stato osservato che il profilo di tensione ricalca il profilo di velocità con un ritardo di circa 30 secondi, attribuito all'inerzia termica del sistema sottocassa.

¹² Durante il periodo in cui è stata svolta l'attività di ricerca, non si è riscontrato nessun caso in cui la batteria abbia subito un ciclo completo di scarica e successiva ricarica completa. Inoltre, non è mai stata individuata alcuna batteria in stato di evidente degrado. Tutti i cicli osservati a bordo sono parziali ed incompleti.

$$L_{esempio} = -58[A] \cdot 24[V] \cdot 50[s] / 3600[s / hr] = -20[Wh] \quad (2.5)$$

Confrontati con la capacità nominale della batteria (8160Wh) risulta che il ciclo in esempio è circa lo 0,25% del ciclo carica/scarica completo.

$$L_{completo} = -340[Ah] \cdot 24[V] = -8160[Wh] \quad (2.6)$$

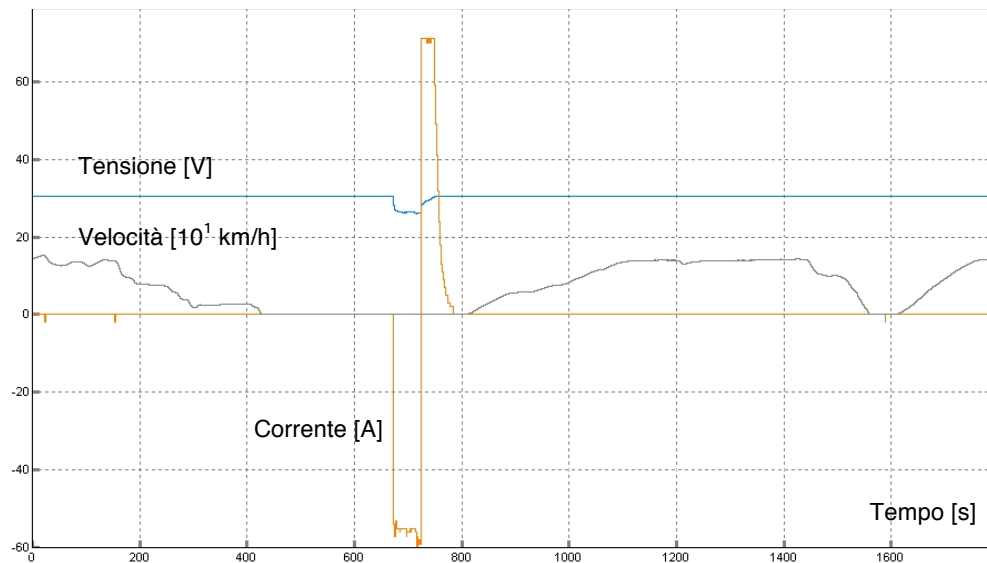


Fig. 2.8 – Andamento delle grandezze elettriche a seguito di una manovra durante il normale esercizio della locomotiva E 464 573, 30 Giugno 2011

Una manovra della locomotiva richiede energia dalla batteria, in generale, tutte le operazioni che precedono il contatto del pantografo¹³ e quelle successive al distacco dello stesso¹⁴, interessano la batteria e sono state analizzate.

¹³ Accensione della locomotiva per il normale utilizzo quotidiano.

¹⁴ Spegnimento della locomotiva a seguito del normale utilizzo quotidiano.

CAPITOLO 3

MANUTENZIONE

3.1 MANUTENZIONE PROGRAMMATA

Attualmente l'approccio adottato nel ferroviario per garantire affidabilità e disponibilità delle componenti è basato su manutenzione programmata e ridondanza delle stesse. L'esperienza maturata negli anni ha dettato gli intervalli ottimali tra interventi manutentivi. Questi sono realizzati in modo da trovare un compromesso che mantenga elevata l'affidabilità e ridotto l'impatto economico¹⁵.

Gli interventi manutentivi sono attualmente divisi in due livelli e mostrati in tabelle che separano gli interventi a scadenza chilometrica da quelli a scadenza temporale. Si veda rispettivamente Tab. 3.1 e Tab. 3.2.

Il Piano di Manutenzione di 1° livello della Locomotiva E464 riporta tutte le operazioni di manutenzione preventiva programmata, distribuite su vari livelli di intervento (a scadenza chilometrica o a tempo), da effettuarsi sulla locomotiva fino alla percorrenza di 1.000.000 di km.

Il Piano di Manutenzione di 2° livello, a scadenza chilometrica, è da effettuarsi sulla locomotiva successivamente alla percorrenza di 1.000.000 di km.

¹⁵ Il costo manutentivo dipende dal costo dell'operazione (materiale, manodopera, etc.) e dagli effetti dall'eventuale disservizio introdotto.

Tab. 3.1 - Intervalli di manutenzione a scadenza chilometrica

Verifica	Livelli	Distanza (km) (+/- 5%)	Tipo di manutenzione
CO ¹⁶	Manutenzione programmata di 1° livello	16.000	Ispezione
RT ¹⁷		80.000	Ispezione
2RT		160.000	Ispezione
5RT		400.000	Ispezione
10RT		800.000	Ispezione
RCC ¹⁸	Manutenzione programmata di 2° livello	1.200.000	Revisione carrelli
RO ¹⁹		2.400.000	Revisione di officina

Tab. 3.2 - Intervalli di manutenzione a scadenza temporale

Verifica	Livelli	Tempo limite massimo di funzionamento	Tipo di manutenzione
a tempo	Manutenzione programmata di 1° livello	6, 12, 24, 36, 48, 60, 72 Mesi	Controllo o revisione

Gli interventi di manutenzione, da effettuare in base alla distanza percorsa o al tempo massimo, non sono da considerarsi mutuamente esclusi. Ciò significa che, in occasione di un intervento manutentivo programmato ad un dato

¹⁶ CO Controllo di Officina. Consiste in un insieme di controlli visivi su rodiggio, carrelli, organi sottocassa e pantografi finalizzati al rilevamento di eventuali avarie o anomalie al fine di garantire la sicurezza, la regolarità di esercizio e la massima disponibilità commerciale del mezzo. Da effettuarsi ad intervalli programmati di 16.000 km.

¹⁷ RT Revisione di Turno. Da effettuarsi ad intervalli programmati di 80.000 km.

¹⁸ RCC Revisione Ciclica Carrelli, sostituzione delle Sale e revisione o sostituzione di componenti critici, da effettuarsi ad intervalli di percorrenza di 1.200.000 Km.

¹⁹ RO Revisione Officina, da effettuarsi ad intervalli di percorrenza di 2.400.000 Km.

intervallo chilometrico o temporale, debbono essere effettuati anche gli interventi manutentivi programmati agli intervalli sottomultipli precedenti.

Le operazioni di manutenzione da effettuarsi a 1.200.000 km e 2.400.000 km comprendono tutte quelle da effettuarsi a scadenze sottomultiple.

Durante queste revisioni che prevedono lo smontaggio di molte componenti, vengono rese accessibili gran parte delle strutture meccaniche, i controlli sono accurati e focalizzati all'individuazione di eventuali spaccature, piegature, lesioni in generale ed altre avarie.

Ad esempio, gli interventi di manutenzione preventiva di 1° livello da effettuarsi sulla locomotiva prima del raggiungimento della percorrenza di 1.200.000 di chilometri possono essere schematizzati come mostrato in Fig. 3.1.

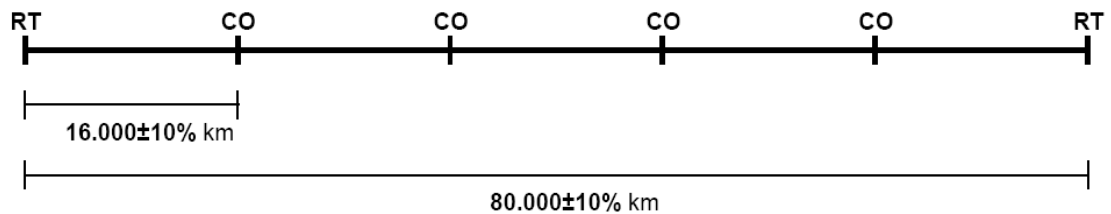


Fig. 3.1 – Schema visivo per la manutenzione di primo livello.

Le scadenze chilometriche a cui sono associati gli interventi di manutenzione sono state determinate convertendo i tempi massimi di funzionamento degli impianti/componenti (tra interventi successivi) in chilometri di percorrenza della locomotiva in funzione del profilo di missione previsto di 160.000 km/anno.

Queste scadenze dovranno essere riesaminate nel caso in cui il profilo di missione reale si discosti da quello previsto.

Quanto presentato è l'approccio utilizzato per mantenere il sistema locomotiva. Ciascun sottosistema ha un relativo documento di riferimento che guida il manutentore.

Di seguito è riportato un elenco di azioni che il manutentore è tenuto a compiere sulla batteria e sulle parti correlate. Alcuni dettagli sono stati omessi.

- CB1 e CB2 (ogni 240.000 Km)
 - pulizia generale;
 - controllo collegamenti elettrici;
 - controllo fissaggi meccanici.
- Vano batterie (RT)
 - Controllare lo sportello anteriore;
 - pulire il vano batterie;
 - controllare la presenza di incrostazioni dovute alla fuoriuscita di elettrolita (eventualmente rimuovere);
 - controllare la scorrevolezza delle guide (eventualmente ingrassare).
- Sottocassa (RT)
 - Controllare lo sportello anteriore;
 - pulire il vano batterie;
 - controllare la presenza di incrostazioni dovute alla fuoriuscita di elettrolita (eventualmente rimuovere);
 - controllare la scorrevolezza delle guide (eventualmente ingrassare).
- Batteria (CO)
 - Pulizia generale;
 - Verifica serraggio cavi;
 - Controllo liquido elettrolita;
 - 6 cm dall'elemento per batteria elettricamente già carica; in caso di batteria scarica sono sufficienti 5 cm per evitare eventuali ebollizioni.

- Misurare la densità con un densimetro per batterie. Se la densità²⁰ è maggiore di 1.19 kg/l aggiungere acqua distillata; se la densità è minore di 1.19 kg/l aggiungere elettrolita²¹.

3.2 CONDITION BASED MAINTENANCE

Qualunque sistema fisico è soggetto ad invecchiamento, le componenti ed i sottosistemi che lo compongono si degradano. Questo comporta una variazione delle grandezze caratteristiche del sistema che in genere è monotona e peggiorativa. I fattori d'invecchiamento sono molteplici e possono agire sinergicamente portando inesorabilmente il sistema al disservizio.

È possibile stabilire dei valori limite per le proprietà caratteristiche, al raggiungimento dei quali, il sistema non si ritiene più idoneo all'esercizio, tale limite espresso in termini temporali è denominato vita.

Per la batteria in esame, il costruttore dichiara 25 anni di vita, obiettivo che può essere raggiunto rispettando l'uso e la manutenzione prescritti. Le reali condizioni d'utilizzo non possono essere previste ed occorre considerare anche lo stress introdotto da situazioni straordinarie. A quanto detto va aggiunto che la batteria è composta da 20 celle, il livello di stress può variare leggermente da una cella all'altra anche se riposte nello stesso vano batterie. Basti pensare che, quando il treno è in corsa, nel vano può circolare un flusso d'aria, quindi le celle più esposte al flusso subiranno un differente invecchiamento termico rispetto a quelle meno esposte, esempio che può essere esteso anche alle polveri, alle vibrazioni, al campo elettromagnetico, etc.

²⁰ La densità dell'elettrolita in una batteria alcalina non è estremamente importante: essa può variare, a seconda della temperatura da 1.17 a 1.22 kg/l senza problemi.

²¹ Soluzione di idrossido di potassio (KOH) con 20% di idrossido di litio (LiOH).

Sebbene prodotte col medesimo processo produttivo ed appartenenti allo stesso lotto, le celle che compongono la batteria possono differire le une dalle altre. Il valore dei parametri che caratterizza la cella si discosta dal valore atteso per la varianza non spiegata. Ne segue che si avranno diverse condizioni iniziali per le proprietà caratteristiche delle celle che compongono il sistema batteria.

Il sistema batteria tende ad accentuare le differenze iniziali tra le celle piuttosto che ad uniformarle²², è quindi naturale aspettarsi che un intervento manutentivo regolare nel tempo sia eseguito per livelli d'invecchiamento non regolari.

La manutenzione programmata per sua natura comporta che vengano stabiliti a priori gli intervalli manutentivi. Scadenza temporale o chilometrica però, non possono prevedere con esattezza l'effettivo degrado ma si limitano a fornire una stima basata sull'esperienza accumulata dal costruttore. Risulta ora evidente che programmare a priori gli interventi porta mantenere le componenti a diversi livelli di degrado.

Idealmente la manutenzione dovrebbe avvenire ogni qual volta le proprietà del sistema siano scese sotto un valore prestabilito in modo da riportarle a valori accettabili. Programmando a priori l'intervento può capitare che la manutenzione venga effettuata in anticipo oppure in ritardo rispetto al degrado prestabilito.

Mantenere in ritardo può introdurre dei rischi legati al superamento dei limiti stabiliti per le proprietà, di conseguenza si tende a mantenere più frequentemente del necessario con evidente incremento del numero d'interventi manutentivi e dei costi correlati. I dovuti margini di sicurezza sono a discapito dell'economicità.

²² L'eventuale presenza in una batteria di una cella con capacità ridotta comporta che tale cella sia la prima a scaricarsi completamente e la prima a completare la ricarica. Questa condizione porta la cella con capacità ridotta a compiere cicli sono più profondi rispetto alle altre celle, per questo motivo è maggiormente sollecitata. La velocità con cui degrada è maggiore rispetto a quella delle altre celle ed è crescente col susseguirsi dei cicli.

È evidente che il momento ideale per eseguire l'intervento manutentivo non può essere preventivato con certezza, per questo motivo nasce l'idea di una manutenzione sulla base delle effettive condizioni delle componenti, condition based maintenance (CBM).

L'obiettivo del CBM è di intervenire quando necessario, ossia nel momento in cui l'invecchiamento del componente raggiunge un livello prestabilito. Occorre quindi individuare delle proprietà indice sulle quali valutare il momento in cui intervenire. La difficoltà maggiore è nel capire quali siano tali indici e di come l'evoluzione di questi sia correlata all'effettivo stato del sistema.

Se correttamente implementato, nei confronti della manutenzione programmata, il CBM realizza una soluzione più raffinata del semplice tempo di esercizio (o chilometri percorsi) ed introduce alcuni vantaggi:

- Riduce il numero d'interventi a quello strettamente necessario;
 - Riduce l'incidenza annua di errore umano;
 - Riduce i costi annui legati alla manodopera;
- Garantisce che sia mantenuta l'affidabilità desiderata;

il CBM comporta anche alcuni svantaggi:

- Tempo tra gli intervalli manutentivi non prevedibile;
- Costo manutentivo variabile e ripartito disomogeneamente negli anni;
- Aumento delle componenti che richiedono manutenzione.

Per giungere ad un CBM correttamente implementato occorrono tempi lunghi ed un costo d'implementazione che può superare il valore del componente.

I consistenti vantaggi introdotti, in particolar modo nel lungo periodo, hanno spinto il CBM ad essere introdotto in svariati ambiti ed è presente anche in applicazioni particolarmente esigenti in termini di affidabilità. Tale approccio inizia ad essere adottato anche nella trazione ferroviaria con tendenza ad includerlo anche in applicazioni dal costo e taglie inferiori.

Analizziamo ora le conseguenze che il CMB comporta se applicato al sistema batteria. Solitamente quando si attinge all'energia immagazzinata nella batteria, subito dopo la si ricarica; questa compie tipicamente cicli incompleti e poco profondi. In particolari occasioni potrebbe essere necessario attingere ad un'energia maggiore rispetto a quanto richiesto nei normali cicli, si realizza in questi casi una scarica più profonda. Le particolari occasioni cui si riferisce potrebbero essere condizioni di emergenza. Basti pensare ad uno stop in galleria dove luci ed areazione di emergenza devono essere garantite. Situazioni poco augurabili ma possibili richiedono una batteria sana per adempiere le funzioni per cui è stata pensata. Una spiacevole sorpresa potrebbe essere quella di avere a disposizione meno energia di quella prevista, occorre quindi assicurarsi che si trovi ad un accettabile stato di salute.

La manutenzione attualmente in vigore, volge ad assicurarsi che una batteria con una capacità inferiore all'80% della nominale, non sia mai in esercizio. È evidente che potrebbe capitare il caso in cui la manutenzione programmata porti ad intervenire su batterie sane. Oppure, in uno scenario peggiore che vengano lasciate in esercizio batterie dalle prestazioni inferiori alle minime accettabili.

Il metodo manutentivo previsto per la batteria può essere migliorato attraverso il CBM. Lasciando da parte gli aspetti economici, l'aspetto affidabilistico ne troverà sicuramente vantaggio, ma poiché il materiale rotabile è realizzato per essere estremamente longevo anche l'aspetto economico non tarderà a presentare i suoi vantaggi.

La creazione di un algoritmo in grado di attuare il CBM, prevede l'individuazione di parametri indice d'invecchiamento. Individuata una relazione tra i parametri indice e livello di invecchiamento, occorre esser in grado di monitorare con continuità tali indici. L'algoritmo per il CBM richiederà manutenzione qualora venga raggiunto il livello di invecchiamento per cui questa è prevista.

La stima del livello d'invecchiamento raggiunto può esser estrapolata dal monitoraggio del valore di più parametri indice e dalle loro eventuali sinergie nelle variazioni.

L'applicazione del CBM può realizzarsi a seguito di un periodo di transizione che può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- Affiancamento preliminare, l'algoritmo per il CBM è attivo ma non può intervenire, è applicata la manutenzione programmata. Lo scopo è di osservare se l'algoritmo fornisce intervalli manutentivi con una frequenza accettabile;
- Affiancamento per la messa a punto, fase simile alla precedente ma dove le due manutenzioni possono convivere. Il CBM in questo caso può anticipare o ritardare l'intervento manutentivo. Occorre misurare il degrado delle proprietà indice per l'algoritmo in modo tale da effettuare una taratura dello stesso. Possibile inizio dei benefici economici.
- Sostituzione della manutenzione programmata. Fase attuabile solo a seguito di una messa a punto ottima dell'algoritmo.

La creazione dell'algoritmo e la fase preliminare richiedono notevoli risorse e continue revisioni, per questi motivi è stato scelto di elaborare le misure in un laboratorio a terra, piuttosto che a bordo della locomotiva.

In un secondo tempo, l'algoritmo o parti di esso potranno essere trasferiti a bordo, opportunamente ottimizzato potrà essere inserito nella logica di veicolo.

3.3 PROGETTO DI TELEDIAGNOSTICA

È stato avviato recentemente un progetto per lo sviluppo di un sistema di telediagnostica il quale prevede l'installazione su ogni locomotiva di moduli per la comunicazione a terra. Il progetto permette di avere a disposizione per l'analisi una vasta selezione di grandezze.

I dispositivi di comunicazione, denominati MCG (Mobile Communication Gateway), creano e memorizzano dei file contenenti le registrazioni dell'evoluzione nel tempo della selezione di grandezze. I file sono trasmessi a terra utilizzando i protocolli dati GSM-R/GPRS e UMTS. A Vado Ligure è presente un laboratorio dove i dati provenienti dalle varie MCG sono raccolti e

messi a disposizione di tecnici e sviluppatori mediante un server provvisorio accessibile.

La presente trattazione è stata redatta osservando registrazioni provenienti da 4 MCG corrispondenti a 4 locomotive che effettuano regolare servizio nel territorio nazionale. Le locomotive osservate (secondo la nomenclatura adottata da Trenitalia) sono:

- E464_508
- E464_573
- E464_575
- E464_594

Attualmente le grandezze selezionate per le registrazioni sono 73 di cui 7 sono state aggiunte per consentire l'applicazione del CBM sulla batteria. Tali grandezze vengono campionate ad intervalli regolari di 140 ms ed inviate a terra sotto forma di file contenenti al più mezzora di registrazione.

Il progetto prevede l'estensione della telediagnostica su altre locomotive, 100 dispositivi MCG sono in fase di setup, l'installazione avverrà al ritmo di circa 8 installazioni/settimana (con termine a maggio 2012).

Il progetto includerà anche il treno Zefiro V300²³ il quale è nativamente equipaggiato con moduli MCG. La locomotiva E464 e Zefiro V300, potrebbero beneficiare del CBM.

L'alternativa alla telediagnostica è un'analisi a bordo, che però nella fase preliminare di sviluppo del CBM non è stata considerata idonea, sia per l'esigua potenza di calcolo a disposizione, sia per la frequenza delle revisioni all'algoritmo necessarie in questa fase.

²³ Zefiro V300 è un treno alta velocità offerto in collaborazione con AnsaldoBreda a Trenitalia. La proposta ha fatto aggiudicare una prima commessa di 50 treni che inizieranno ad entrare in servizio nel 2013 sotto la denominazione ETR1000.

È stato deciso di non introdurre alcuna modifica al sistema, escluso il modulo MCG il sistema è intatto. Il modulo MCG inoltre ha il solo scopo di osservare e trasmettere i dati già presenti nel bus di sistema, senza apportare alcuna variazione. Sebbene metter mano al sistema locomotiva possa essere di aiuto per una rapida e corretta implementazione del CBM, esso potrebbe introdurre un rischio nel complesso sistema locomotiva. Apportare modifiche può esporre ad errori che è stato scelto di non correre, inoltre per gli stessi motivi non verranno testate le apparecchiature che sono già installate nella locomotiva, eventuali test saranno eseguiti sul materiale disponibile in magazzino.

L'analisi a terra ha permesso di lasciare ampio spazio alle sperimentazioni, non si esclude un successivo trasferimento del CBM della batteria a bordo.

CAPITOLO 4

TEST DI LABORATORIO

Durante l'analisi dei dati raccolti nel quotidiano esercizio della locomotiva, si è vista la necessità di un confronto con dati di riferimento. Tali dati relativi alla batteria non sono però disponibili; di questa si hanno solo le specifiche tecniche (si veda Fig. 4.1). Il problema che si è subito posto risiede nell'impossibilità di eseguire direttamente dei test sulle batterie che equipaggiano le locomotive osservate. Si è scelto di non estrarre le batterie dai propri alloggiamenti e di non interferire in alcun modo nel corretto funzionamento della batteria, quindi non sono state effettuate prove al banco di batterie già in esercizio nelle locomotive. Estrarre le batterie dai propri alloggiamenti è in contrapposizione con le scelte fatte in precedenza, per lo stesso motivo non sono stati neppure modificati i cicli di lavoro della batteria per osservarne il funzionamento mediante MCG. È unicamente possibile osservare le grandezze durante il normale utilizzo, pertanto si è scelto di non compiere nessuna azione preliminare su tali batterie.

La necessità di avere dati di confronto è stata parzialmente soddisfatta attraverso la realizzazione di un circuito di prova sul quale sono state testate batterie di stessa marca e modello di quelle presenti nelle E464 ma prelevate dal magazzino.

Al banco prova sono state testate due batterie, una più vecchia ed una nuova. La batteria vecchia è stata riposta 10 anni in magazzino, saltuariamente utilizzata come sorgente di alimentazione per alcuni circuiti BT, è prevalentemente invecchiata per il tempo trascorso dalla data di fabbricazione piuttosto che per l'utilizzo.

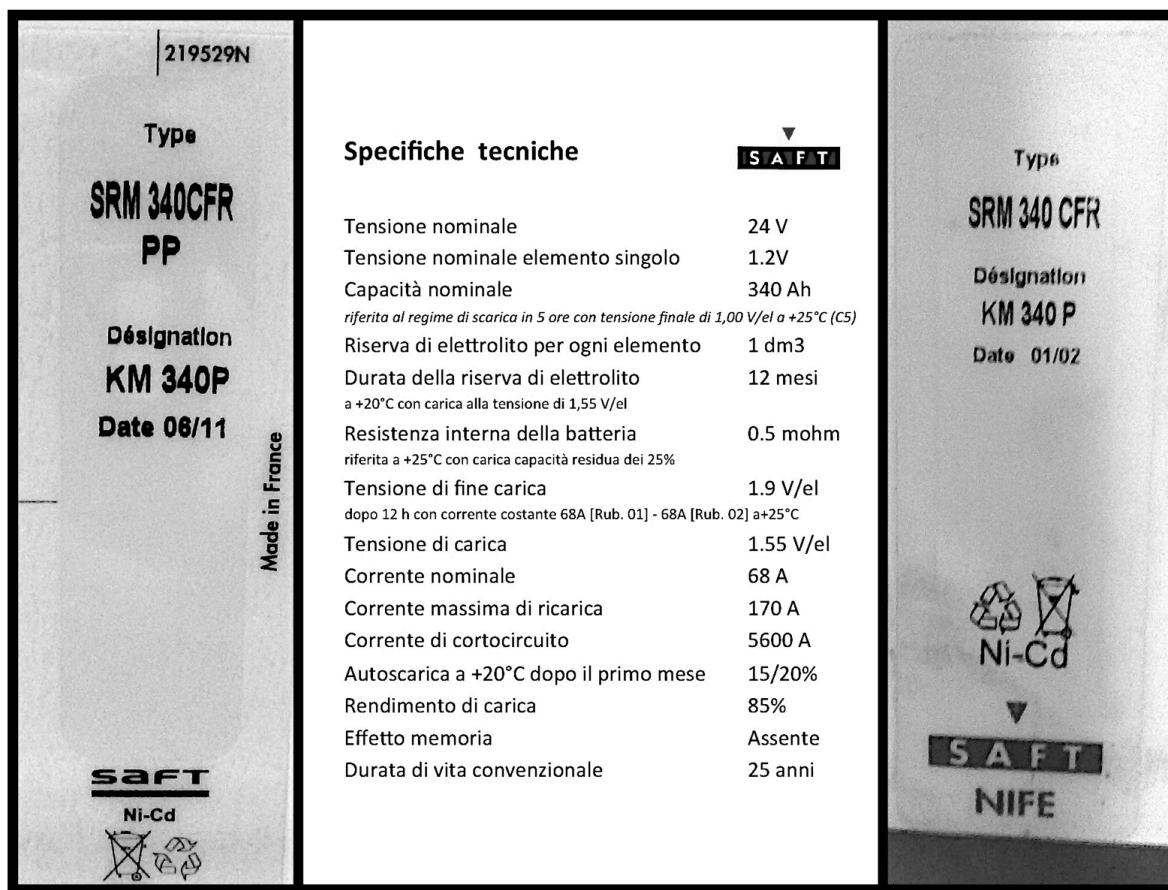


Fig. 4.1 – Specifiche tecniche fornite con le batterie e relative etichette con data di produzione ai bordi.

4.1 CIRCUITO DI PROVA

Il circuito di prova, mostrato in Fig. 4.2, è realizzato per l'effettuazione di cicli completi e permette di testare una batteria alla volta. Per la realizzazione del circuito si è utilizzato, quando disponibile, del materiale rotabile. Il carico è costituito da una coppia di reostati ferroviari inseribili singolarmente o in parallelo. Il circuito è equipaggiato con un caricabatterie che è stato ricavato da un regolatore di corrente anch'esso di origine ferroviaria. Il circuito è in grado di ricaricare la batteria a tensione o corrente costante.

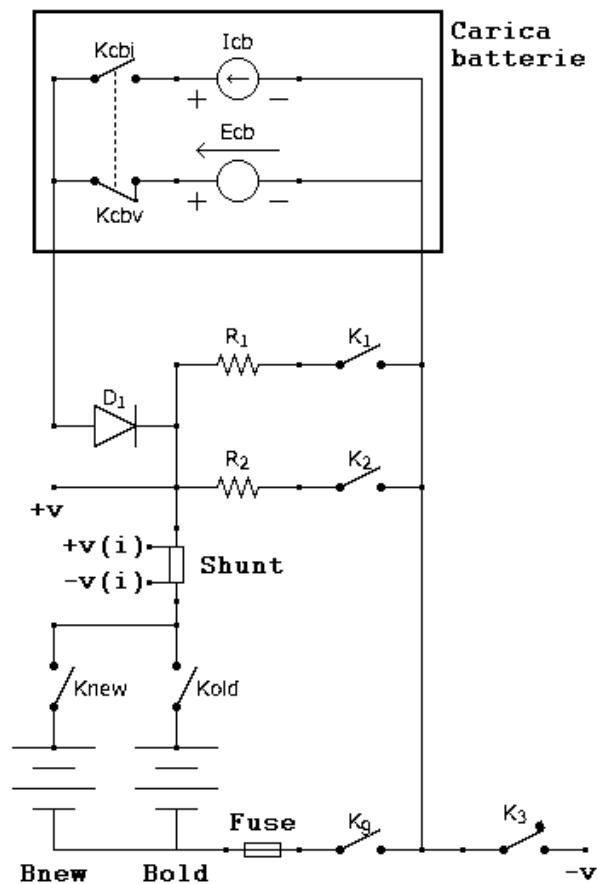


Fig. 4.2 – Circuito di prova realizzato per i test al banco delle batterie

Legenda:	Shunt	60mV/75A
	R1	0.8 ohm
	R2	0.8 ohm
	Fuse	300A
	K1 e K2	teleruttori comando reostati
	Knew e Kold	teleruttori comando batterie
	K3	interruttore generale
	Kg	sezionatore manuale generale
	D1	diodo di protezione per il caricabatterie
	+V -V	punto di misura della tensione di batteria
	+V(i) -V(i)	punto di misura della corrente

Ai punti di misura di tensione e di corrente è stato inserito un wattmetro YOKOGAWA WT1600 col quale è stato possibile effettuare un campionamento delle grandezze elettriche misurate. Il campionamento è eseguito ad intervalli di un sample al secondo, costante per tutta la durata delle prove. Le serie di dati sono salvate nel wattmetro e successivamente esportate e rese disponibili al calcolatore.

Un'immagine del circuito di prova realizzato è in Fig. 4.3.

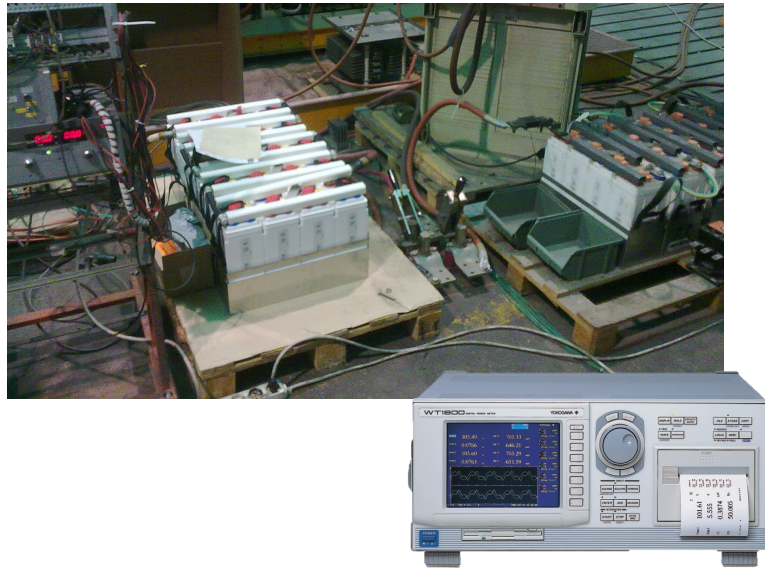


Fig. 4.3 – Da sinistra: caricabatterie, batteria nuova, batteria vecchia. Sotto: wattmetro YOKOGAWA WT1600

4.2 TIPOLOGIE DI PROVE EFFETTUATE

Sono state eseguite prove su due batterie una vecchia di 10 anni ed una nuova, identiche per dati di targa, produttore e modello (Saft SM-610, v. Fig. 4.1).

Le prove consistono in scariche su uno o due reostati ferroviari in parallelo. Durante alcune scariche è stato bruscamente variato il carico in modo simulare l'esercizio della batteria a bordo. Sono state monitorate anche le ricariche sia nella modalità a corrente costante (30 A) sia nella modalità a tensione costante (1.55 V/eI).

Prove eseguite sulla batteria prodotta nel 2002

1. Dopo esser stata parzialmente ricaricata la batteria ha subito una scarica sul parallelo dei due reostati. Nella fase finale della scarica la tensione di un elemento si è abbassata bruscamente risultando prossima a zero.
2. La batteria è stata ricaricata considerando lo stato di carica come ultimato non appena la ricettività di corrente sia inferiore a 5 A.
3. La batteria ha subito una scarica con carico variato secondo una sequenza prestabilita²⁴.
4. La batteria è stata ricaricata considerando lo stato di carica come ultimato non appena la ricettività di corrente sia inferiore a 5 A.

Prove eseguite sulla batteria prodotta nel 2011

1. La batteria è stata ricaricata considerando lo stato di carica come ultimato non appena la ricettività di corrente sia inferiore 5 A.
2. La batteria ha subito una scarica con carico variato secondo una sequenza prestabilita.
3. La batteria è stata ricaricata considerando lo stato di carica come ultimato non appena la ricettività di corrente sia inferiore 5 A.

²⁴ La sequenza prestabilita consiste nell'alternare il carico reostatico predisposto secondo la sequenza: 1hr @0.8 Ω ; 30min @0.4 Ω ; 30min @0.8 Ω ; 3hr @0.4 Ω ; 30min @0.8 Ω ; 30min @0.4 Ω ; @0.8 Ω fino a termine scarica.

4.3 EVIDENZE SPERIMENTALI IN FASE DI SCARICA

Durante la fase di scarica, osservando tensione e corrente di batteria è possibile ricavare la caratteristica mostrata in Fig. 4.4. Generalmente tale andamento è tracciato mantenendo la corrente costante, nel caso in questione invece si ha un carico reostatico, quindi la corrente è variabile in funzione della tensione e della temperatura del reostato. L'effetto termico si ripercuote in un aumento di resistenza, la maggiorazione a regime termico è del 4% rispetto al valore a temperatura ambiente. Il regime termico è raggiunto in un'ora (v. Fig. 4.4).

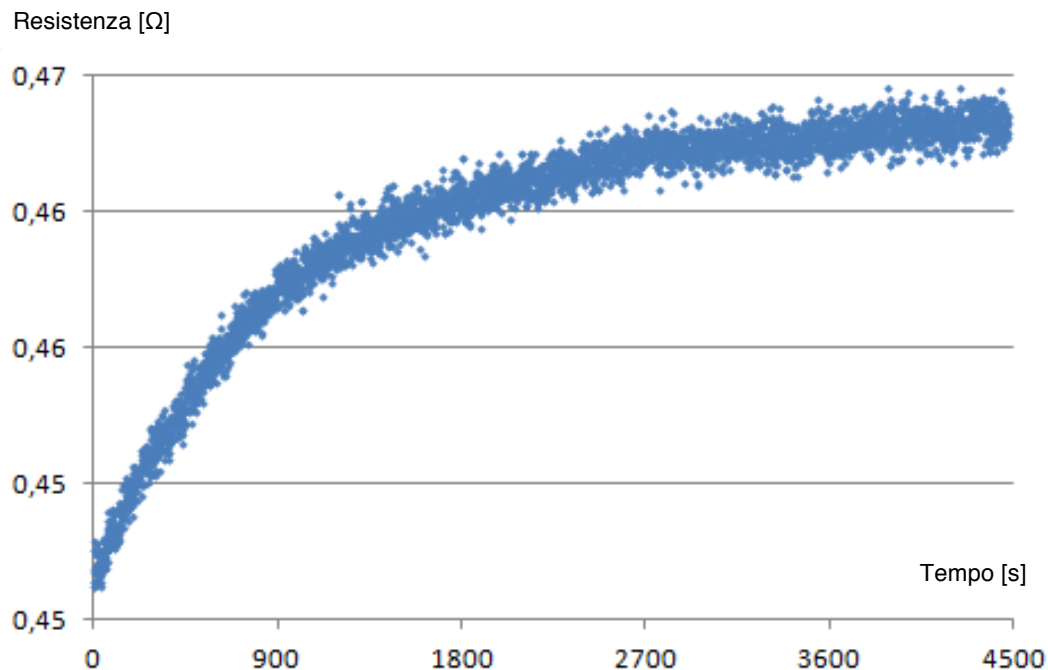


Fig. 4.4 – Resistenza calcolata dal rapporto tensione di batteria e corrente erogata durante la scarica sul parallelo dei reostati.

La prima prova di scarica è stata eseguita sulla batteria vecchia ed interrotta dopo 3.30'. Una panoramica dell'evoluzione della tensione nel tempo è in Fig. 4.5, dove è riportato l'andamento dovuto a contributi e comportamenti dinamici diversi.

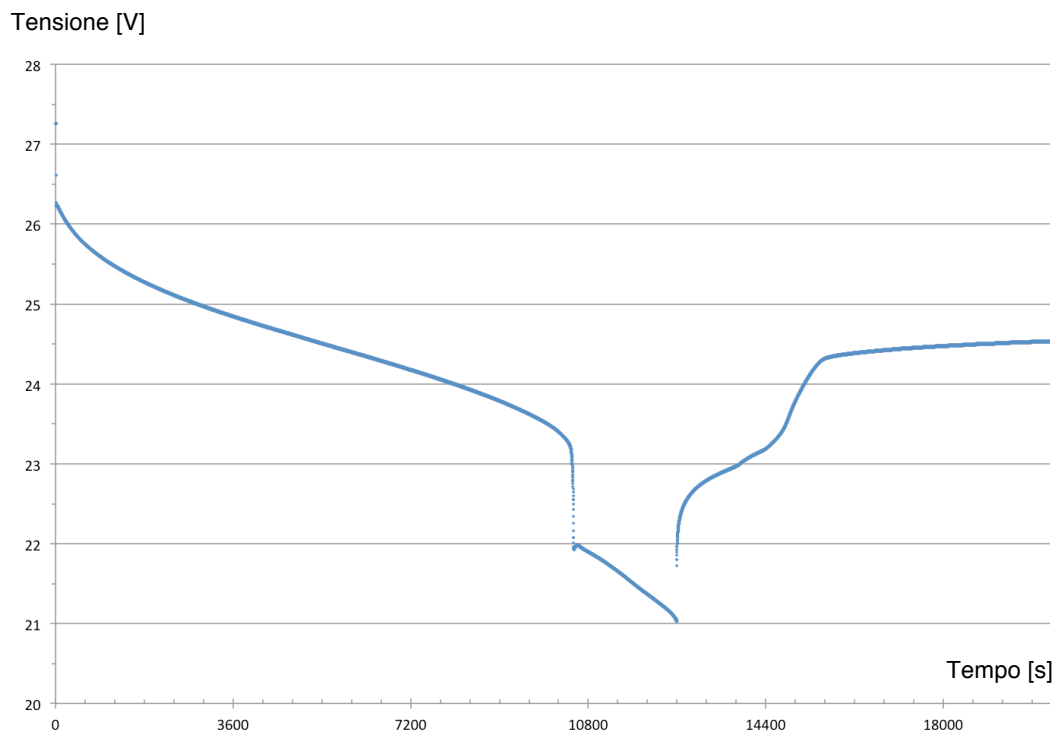


Fig. 4.5 – Tensione durante la prima scarica della batteria vecchia sui reostati in parallelo.

Durante tutto il tempo in cui la batteria alimenta il carico si possono distinguere i contributi che realizzano tale tensione. Il contributo dinamico più rapido estingue in circa due secondi (v. Fig. 4.6) ed è associato ad un transitorio in cui la conduzione ionica non è ancora entrata in gioco. Si attribuisce questo comportamento agli elettrodi della batteria che, affacciati, costituiscono un condensatore piano.

Nel passaggio da vuoto a carico, la tensione di batteria sembra che si riduca di 1V e che si assesti a tale valore. In realtà, da una visione panoramica (v. Fig. 4.5), si nota che l'andamento non si è stabilizzato ma continua a variare con dinamica più lenta per poi diventare lineare. Prima del raggiungimento del tratto lineare si deve attendere un lento transitorio; in questa fase, gestita dalla conduzione ionica, si riconosce il tipico andamento di scarica di una batteria al Nichel. La costante di tempo è di circa mezzora.

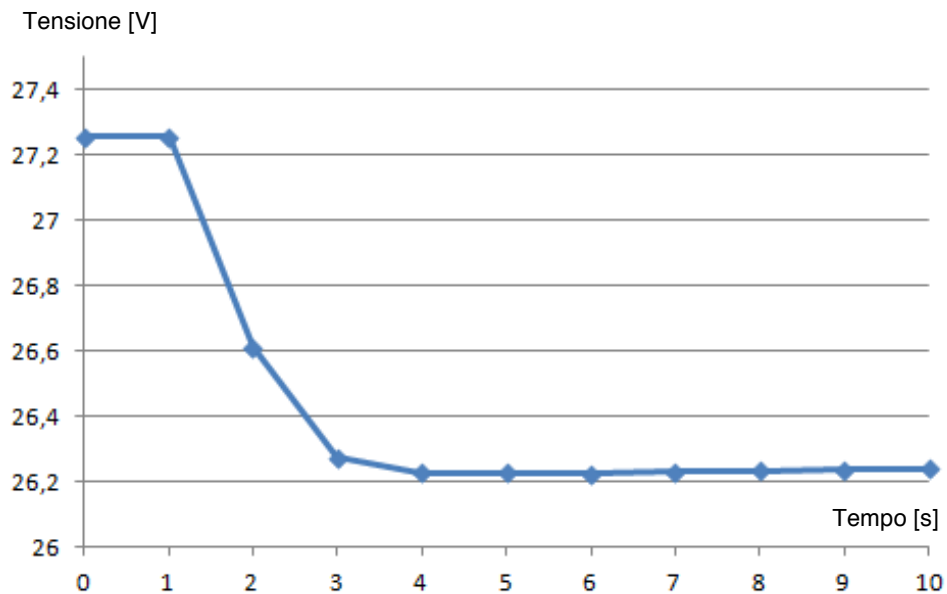


Fig. 4.6 – Tensione di batteria [V] nei primi 10 secondi dall'inserzione del carico

Nella fase a pendenza pressoché lineare la tensione si riduce di circa 0,29 mV/s, tale andamento è mantenuto finché la batteria non è prossima all'esaurimento della carica. Nella prova effettuata il tratto a pendenza lineare è mantenuto per più di un'ora. Nel caso in cui si abbiano apprezzabili variazioni di carico, il tratto lineare si assesta ad una nuovo tasso di pendenza.

Sempre in riferimento a Fig. 4.5, a quasi tre ore dall'inizio della scarica, viene a mancare il contributo di un elemento e la tensione precipita velocemente. Una delle venti celle che compongono la batteria ha esaurito la carica, questo può essere dovuto essenzialmente a due motivi: una cella ha capacità inferiore, oppure si hanno condizioni iniziali differenti; i due motivi possono coesistere.

L'eventuale presenza di una cella con carica inferiore si può apprezzare compiendo una scarica completa della batteria, si noti infatti che non tutte le celle esauriscono la carica contemporaneamente. L'elemento debole si esaurisce per primo e la batteria si comporta come se fosse composta da sole 19 celle dato che quella esaurita è quasi come se fosse cortocircuitata; le restanti suppliscono alla richiesta di carico dando origine ad un nuovo tratto lineare. Quest'ultimo ha pendenza maggiore rispetto a quella precedente.

Consideriamo singolarmente una cella che alimenta un carico resistivo: se questo è costante, la corrente ricalca l'andamento della tensione. Non appena questa esaurisce la carica, la tensione di cella crolla; nessuna forza elettromotrice sostiene la corrente che, quindi, si annulla.

Consideriamo ora una batteria costituita da una serie di celle: la corrente ha un andamento che ricalca la tensione di batteria, non è detto però che essa ricalchi anche l'andamento di tensione della singola cella.

Supponiamo infine che tutte le celle della batteria siano identiche tra loro fatta eccezione per una di esse, la quale presenta capacità ridotta: tale cella esaurisce la carica in anticipo rispetto alle altre. Ponendo l'attenzione sulla cella dalla capacità ridotta, si noti che, non appena questa esaurisce la carica continuerà comunque ad essere percorsa da corrente la quale ricalca l'andamento della tensione di batteria, andamento che risulta ridotto del solo contributo di un elemento. Quelle descritte sono le condizioni che danno origine al fenomeno dell'inversione della polarità (cell reversal).

4.3.1 CELL REVERSAL

Qualora s'imponga alla corrente di fluire attraverso una cella scarica, è possibile ottenere il fenomeno dell'inversione della polarità, noto in letteratura anche coi nomi di Cell reversal o Polarity reversal. Con riferimento a Fig. 4.7 possono essere distinte tre differenti fasi di funzionamento possibile per una cella, enunciate di seguito:

1. Nella prima fase la batteria opera correttamente, la polarità è conforme a quella riportata nell'involucro su cui è realizzata la cella. Durante il normale esercizio, sia in fase di carica che in fase di scarica, si dovrebbe operare in queste condizioni di polarità.
2. È possibile giungere a questa seconda fase solo nelle condizioni in cui si riesca a forzare la circolazione della corrente anche a cella scarica. Condizione possibile in una batteria realizzata con celle in serie. In questa fase il materiale attivo dell'elettrodo positivo si scarica

- completamente producendo idrogeno che evapora consumando liquido elettrolita. La batteria è realizzata con un eccesso di capacità negativa denominata riserva di carica; la scarica può quindi continuare e la tensione si attesta su un valore negativo²⁵ compreso tra 0,2 e 0,4 Volt.
3. Nella terza fase il materiale attivo è esaurito in entrambi gli elettrodi che risultano invertiti nella polarità. Dall'elettrodo negativo si ha formazione di ossigeno mentre continua ad esser prodotto idrogeno da quello positivo.

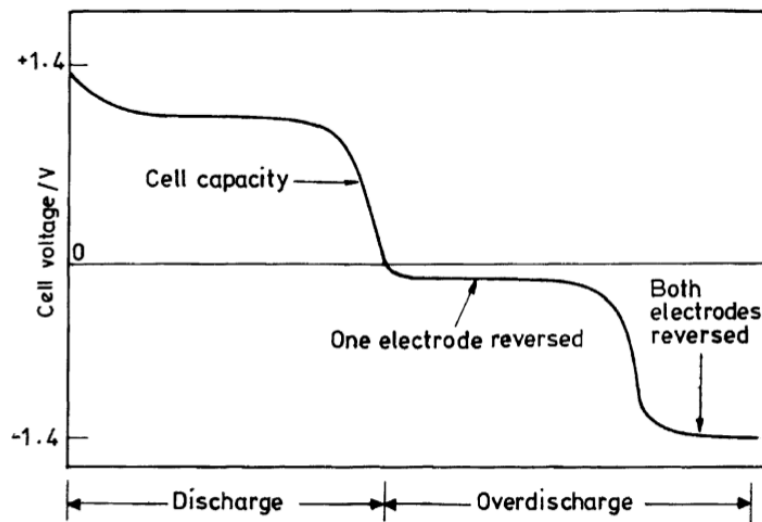


Fig. 4.7 – Fenomeno dell'inversione della polarità della cella [12]

Per l'accumulatore sigillato la seconda e terza fase portano ad un aumento della pressione interna che può condurre allo sfiato della valvola di sicurezza: ne segue un deterioramento della cella.

Per l'accumulatore ventilato ciò porta soltanto all'evaporazione dell'elettrolita che può essere rimboccato. Gli episodi di scarica profonda, con inversione della polarità di uno o entrambi gli elettrodi, sono reversibili; è sufficiente attendere qualche ora con l'elemento lasciato a vuoto oppure ricaricare la cella per i casi di sovrascarica più profonda.

²⁵ Il valore negativo in questione è stato approssimato in precedenza, in questo stesso capitolo, come nullo.

Durante il primo test, dopo un tempo di quasi tre ore dall'inizio della prova, si è verificata l'inversione di polarità per un elettrodo. Tale fenomeno può essere osservato nella Fig. 4.5. Infatti, la tensione di batteria si abbassa del contributo di un elemento (non scende esattamente a zero ma assume potenziale di -0,2/-0,4 V).

Si è scelto di mantenere in esercizio la batteria anche in seguito al crollo della tensione di una cella, la quale opera in condizioni di sovrascarica. Gli elementi che apportano contributo in tensione continuano ad alimentare i reostati: ha così inizio un nuovo tratto lineare a pendenza maggiorata rispetto al precedente. Si vedano i tratti sovrainpressi all'andamento mostrato in Fig. 4.8.

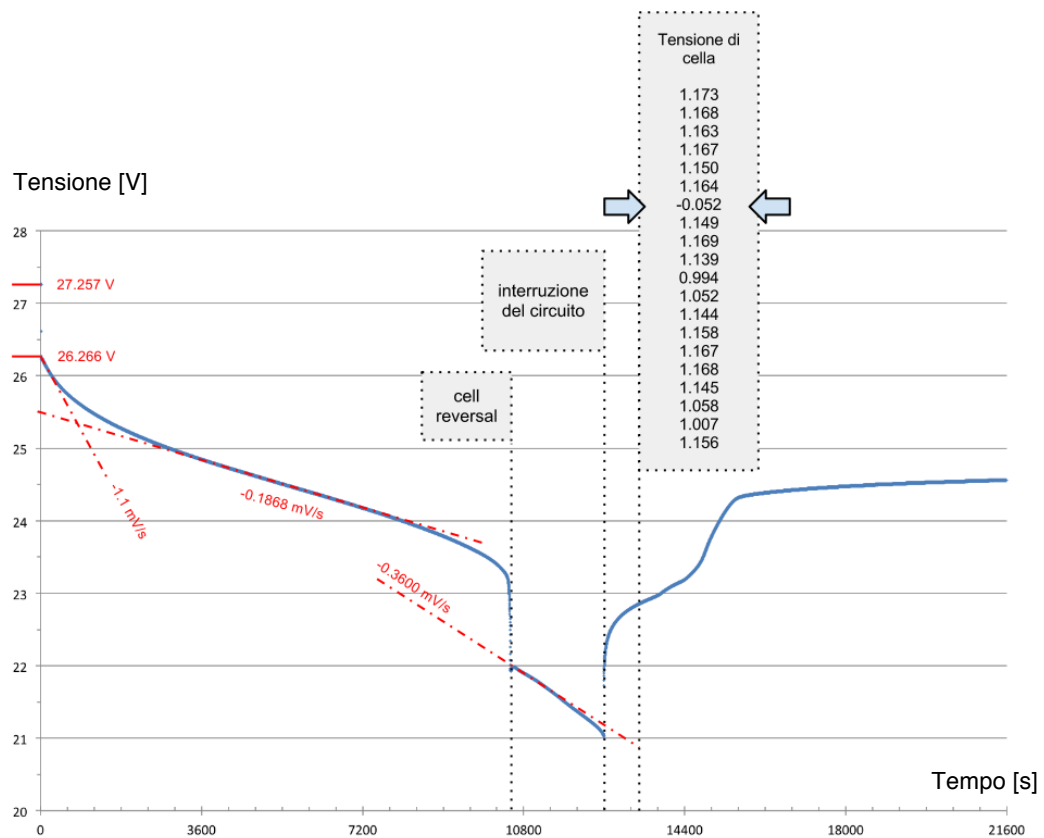


Fig. 4.8 – Panoramica dei campionamenti di tensione con dati emersi dall'analisi grafica e tensione misurata al termine della scarica

Per evitare la produzione d'idrogeno ed ossigeno contemporaneamente, si è scelto di non forzare la cella all'inversione di entrambi gli elettrodi. La scarica è

stata quindi interrotta dopo 35 minuti dall'inversione del primo elettrodo: solo l'elettrodo positivo di una cella si è invertito.

A seguito dell'interruzione della scarica è stato deciso di misurare manualmente la tensione di ogni singola cella per individuare quella debole e responsabile dell'inversione. I valori sono stati misurati con batteria a vuoto nei minuti immediatamente successivi l'interruzione del circuito.

Le celle non presentano tutte lo stesso valore di tensione; le misure manuali effettuate sulle singole celle sono riportate nella tabella di Fig. 4.8.

La tensione ai morsetti della batteria si ristabilisce dopo un'ora dall'interruzione del circuito. Il ristabilimento della cella debole è avvenuto anche senza dover ricorrere a ricarica. La tensione finale a vuoto è pari a 24,6 V.

4.3.2 RIDUZIONE DI CAPACITÀ

Per la misura della capacità dell'accumulatore è stata usata una prova di scarica particolare cui ci riferiremo nel seguito della trattazione indicandola col nome di scarica frazionata. Tale scarica è realizzata variando bruscamente il carico durante la stessa mediante l'inserzione di reostati: singolarmente o in parallelo.

Quando ci si riferisce alla scarica frazionata, s'intende il seguente schema di carico applicato senza pause e nell'ordine in cui è presentato.

- 1 ora con singolo reostato;
- 30 minuti con reostati in parallelo;
- 30 minuti con singolo reostato;
- 3 ore con reostati in parallelo;
- 30 minuti con singolo reostato;
- 30 minuti con reostati in parallelo;
- la scarica prosegue con singolo reostato.

L'evoluzione della tensione di batteria può essere visualizzata in Fig. 4.9.

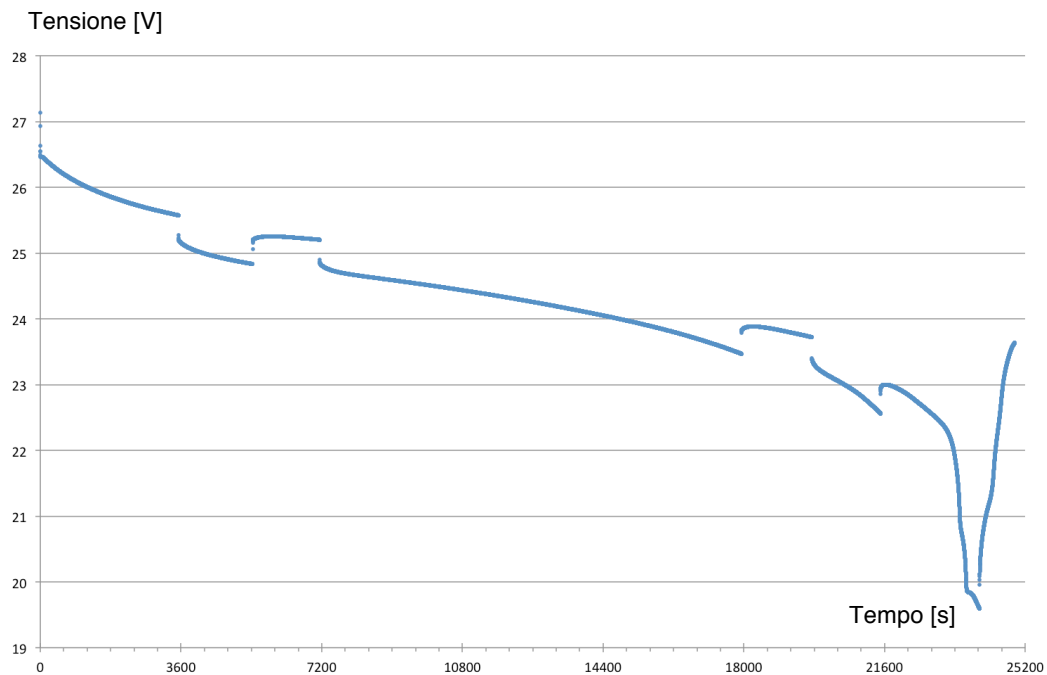


Fig. 4.9 – Evoluzione della tensione per la batteria vecchia sottoposta a prova frazionata.

La misura della capacità è ricavata dalla prova di scarica frazionata integrando nel tempo il prodotto tra tensione e corrente erogata dalla batteria. Tale prodotto ha l'andamento rappresentato nel grafico di Fig. 4.10.

L'integrazione è realizzata considerando costanti tutte le grandezze elettriche tra un campionamento e l'altro, il passo d'integrazione è pari a quello di campionamento fissato a un sample al secondo.

Al raggiungimento di 19,6V di batteria la scarica è interrotta, Il tempo impiegato per raggiungere tale valore di tensione è di 24000 secondi. L'energia erogata durante quest'arco di tempo è pari a 7130 [Wh] ed è proporzionale all'area sottesa al grafico in Fig. 4.10.

Data la capacità nominale dell'accumulatore che è pari a 8160 [Wh], rispetto a questa, la capacità attuale risulta ridotta di un coefficiente moltiplicativo pari a 0,874.

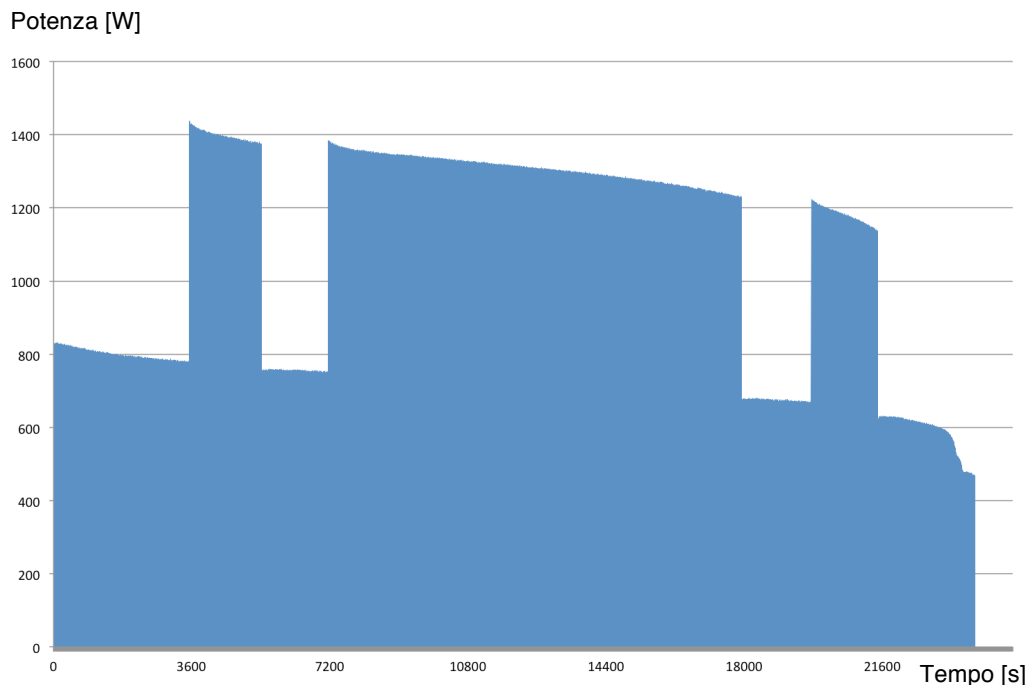


Fig. 4.10 – Potenza erogata dalla batteria nel corso della prova frazionata, l'area sottesa alla curva di potenza è proporzionale all'energia erogata.

Poiché la prova ha avuto inizio dopo la ricarica completa dell'accumulatore, il parametro SoC^{26} è pari al valore massimo. Con SoC massimo, l'energia misurata espressa in percentuale della nominale fornisce il parametro SoH^{27} , come mostrato in Equazione 4.1.

²⁶ State of Charge (SoC); parametro che indica la carica disponibile in un accumulatore, generalmente è espressa in percentuale. SoC pari al 100% si ha per batteria completamente carica.

²⁷ State of Health (SoH); parametro che indica lo stato di salute della batteria espresso in percentuale e riferito alla carica nominale. Un accumulatore che rispecchia appieno le specifiche fornite dal costruttore ha SoH pari al 100% indipendentemente da SoC. Noti: SoH; SoC e capacità nominale, allora è nota l'energia disponibile nell'accumulatore. Sebbene durante i primi cicli SoH potrebbe essere maggiore del 100%, a lungo termine SoH è sicuramente decrescente.

$$SoH = \frac{7130[Wh]}{8160[Wh]} \cdot 100 = 87,4\% \quad (4.1)$$

La capacità nell'accumulatore più vecchio è l'87,4% della nominale; il tempo ed altri fattori hanno degradato le prestazioni.

4.3.3 ANDAMENTO DELLA TENSIONE

La scarica frazionata può essere ripetuta anche per la batteria nuova. Si assume che questa rispetti le specifiche dichiarate dal costruttore in modo tale da non dover valutare l'energia erogata. In questo modo si evita di dover scaricare completamente l'accumulatore. La scelta fatta non interferisce con quanto si vuole ricercare poiché l'attenzione è ora posta nella ricerca di evidenze piuttosto che nel quantificarle.

La scarica frazionata, per quando detto, è stata mantenuta per circa lo stesso tempo che ha impiegato la batteria vecchia a scaricarsi. L'andamento è in Fig. 4.11 e mostrato in sovrapposizione al precedente (Fig. 4.9) opportunamente scalato²⁸ in modo da far combaciare le rispettive tensioni d'inizio scarica dei due accumulatori.

Da un confronto tra gli andamenti mostrati in Fig. 4.11, si nota che nell'accumulatore vecchio, il tasso con cui la tensione decresce è maggiore, questo lascia presagire già dai primi minuti un peggior comportamento nella durata complessiva della prova.

Per non appesantire il grafico in esame non è stata sovrapposta alcuna pendenza (come realizzato in Fig. 4.8), le seguenti considerazioni possono comunque esser tratte:

- nel tratto piatto la pendenza è maggiore per l'accumulatore vecchio;
- risulta maggiore anche il coefficiente angolare della retta tangente alla tensione valutata nei primi minuti che seguono l'inserzione del carico;
- altro indice che rende distinguibili gli accumulatori, quindi degno di nota, è il punto di flesso nell'evoluzione temporale della tensione.

indicativamente per l'accumulatore nuovo occorre dopo 2.30', nel vecchio accumulatore invece il flesso occorre in anticipo di circa mezzora.

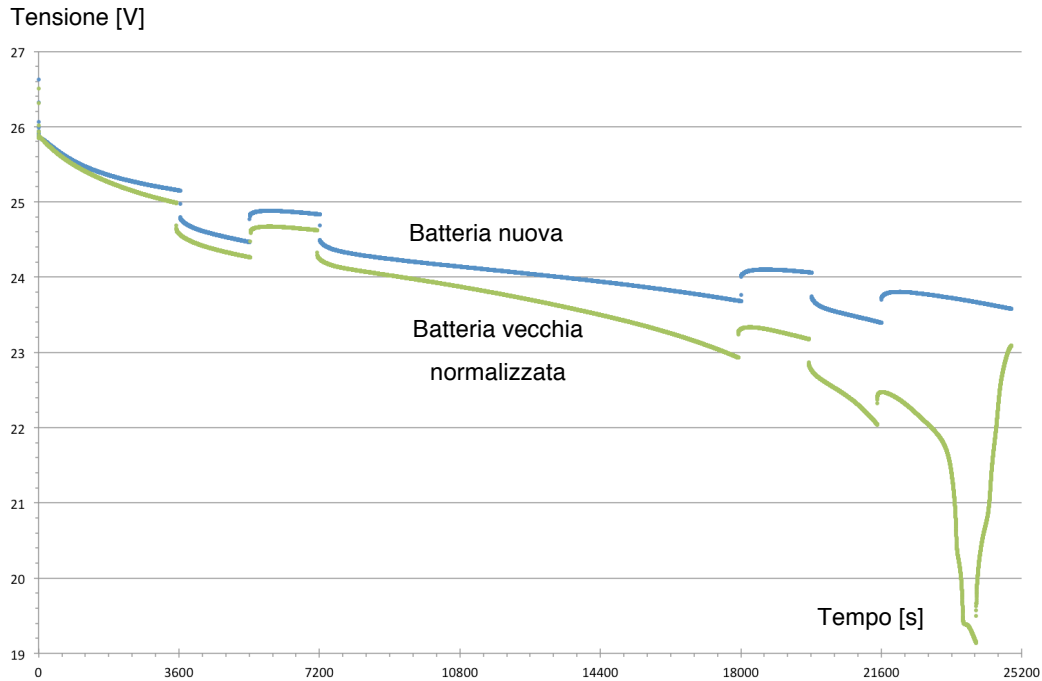


Fig. 4.11 – Confronto tra gli andamenti di tensione della scarica frazionata dell'accumulatore nuovo con quello vecchio opportunamente scalato²⁸.

Inizialmente, la scarica frazionata è stata pensata per verificare l'eventuale presenza di un ulteriore parametro indice di degrado: la resistenza interna dell'accumulatore. Questa col tempo tende ad aumentare ed attraverso la prova frazionata s'intende poter apprezzare tale variazione.

Per le celle sigillate, specialmente nelle taglie di maggior successo commerciale, la resistenza interna subisce variazioni facilmente apprezzabili. Man mano che l'invecchiamento avanza la resistenza interna dell'accumulatore

²⁸ All'andamento è applicato un coefficiente correttivo pari a 0,977, scelto in base al rapporto tra le tensioni d'inizio scarica dei due accumulatori. Il coefficiente correttivo è ritenuto migliore di un semplice traslato in quanto consentirebbe all'accumulatore equivalente di raggiungere corrente nulla per tensione nulla.

aumenta e si riscontra un calo della tensione a parità di corrente erogata. Graficamente, ad una maggior richiesta di carico corrisponde un buco di tensione tanto più profondo quanto maggiore è il degrado. Per la cella sigillata il fenomeno descritto può esser osservato in Fig. 4.12.

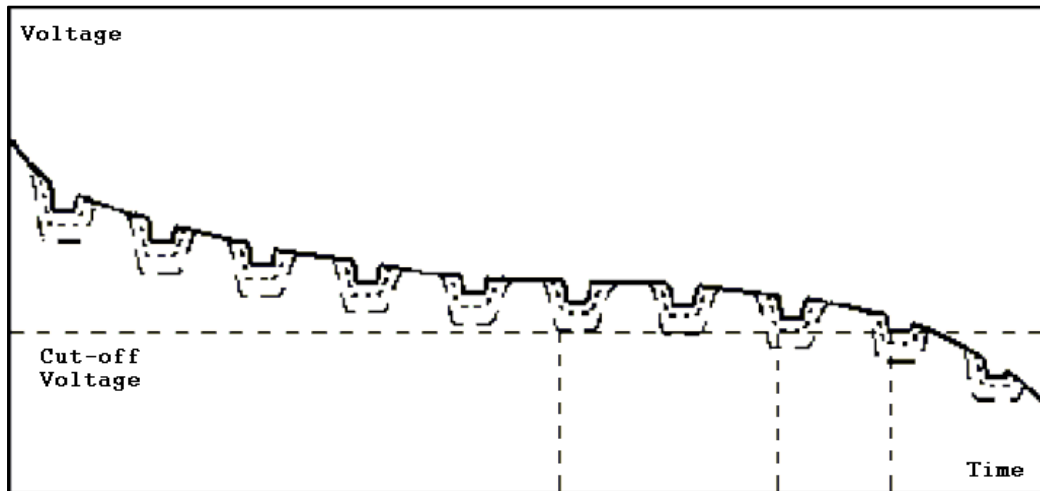


Fig. 4.12 – Buchi di tensione in seguito a scarica frazionata su una batteria di tipo sigillato a diversi livelli d'invecchiamento.

Negli accumulatori di tipo ventilato presi in esame non è stato riscontrato un differente comportamento durante la scarica frazionata. La resistenza interna è un parametro inizialmente molto basso e col tempo non aumenta in modo apprezzabile dalle misure effettuate.

4.4 EVIDENZE SPERIMENTALI IN FASE DI RICARICA

4.4.1 ANTICIPO DELLA COMMUTAZIONE

La fase di ricarica evidenzia comportamenti distinti per i due accumulatori.

Si ricorda che il caricabatterie mantiene la corrente costante a 30A fino al raggiungimento della tensione di 31V, la ricarica prosegue variando la corrente affinché la tensione resti costante.

Rispetto al tempo totale di ricarica si nota una differente ripartizione delle modalità di ricarica: per l'accumulatore vecchio sembra che la fase finale (a tensione costante) impieghi più tempo a completarsi. La corrente quindi, decresce lentamente prima di annullarsi²⁹. L'andamento delle grandezze elettriche, per entrambi gli accumulatori, è mostrato in Fig. 4.13.

Si noti che la batteria vecchia è stata sottoposta ad una breve interruzione della ricarica, questa la rende distinguibile dalla batteria nuova e mette in evidenza come a seguito di un breve transitorio la ricarica continui con la stessa tendenza.

Qualora, per ricaricare gli accumulatori debba esser fornita circa la stessa energia, allora l'operatore che assiste alla ricarica può distinguere le due batterie semplicemente osservando il tempo impiegato nelle due fasi. Sotto queste condizioni il passaggio da ricarica a corrente costante a tensione costante avviene in anticipo sulla batteria vecchia rispetto alla nuova poiché questa impiega meno tempo a raggiungere la tensione di 31V.

Grazie alla breve interruzione introdotta è possibile affermare che il tempo trascorso nelle due fasi di ricarica dipende anche dagli stati precedenti di utilizzo della batteria, nel caso in esame l'accumulatore proveniva da uno stato di ricarica. Diverso sarebbe stato l'andamento se questo fosse lasciato a riposo per un tempo lungo o scaricato.

²⁹ Si ritiene che l'accumulatore sia completamente carico non appena la corrente di ricarica assume il valore di 5 A, con questa scelta si è considerevolmente ridotto il tempo necessario alla ricarica.

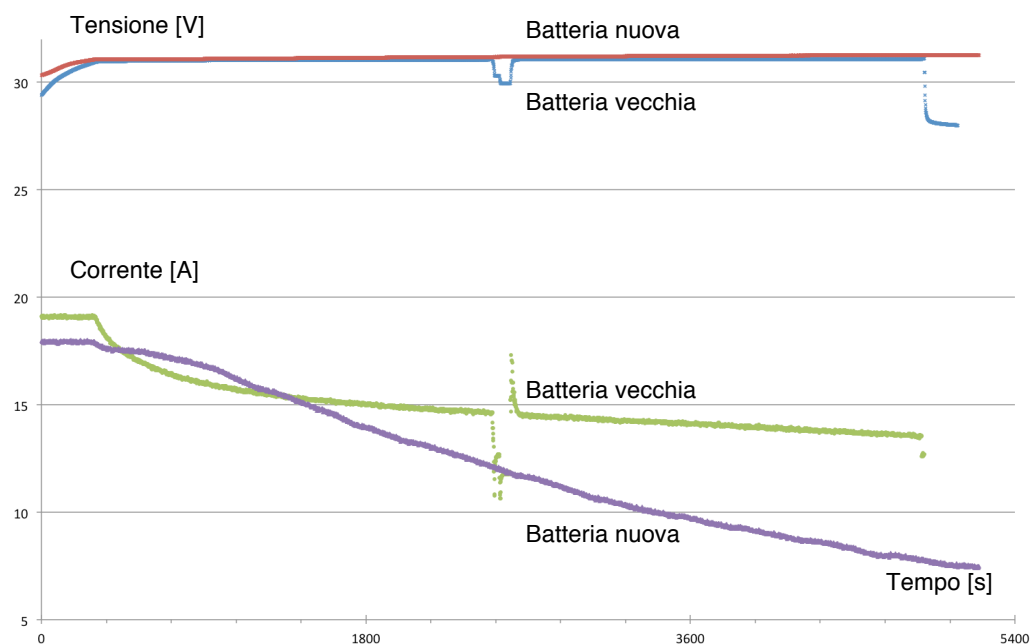


Fig. 4.13 – Confronto tra gli andamenti di tensione e corrente nella fase di cambio di modalità da corrente costante (primi 300 s, 5 minuti) a tensione costante.

4.4.2 FRONTE DI SALITA DELLA TENSIONE

L'istante di tempo in cui avviene la commutazione tra le modalità di ricarica non è il solo parametro degno di nota, è infatti possibile distinguere gli accumulatori anche prima che la commutazione avvenga. Si veda in Fig. 4.14 l'andamento della tensione prima del raggiungimento di 31 V.

Da Fig. 4.14 è possibile notare che nell'accumulatore più vecchio la tensione sale con un andamento frastagliato. Poiché quella misurata è la somma delle tensioni di cella è evidente che questa fase della ricarica, in cui piccoli incrementi dell'energia immessa decretano grandi variazioni di tensione, sia raggiunta in momenti diversi dalle celle che compongono l'accumulatore.

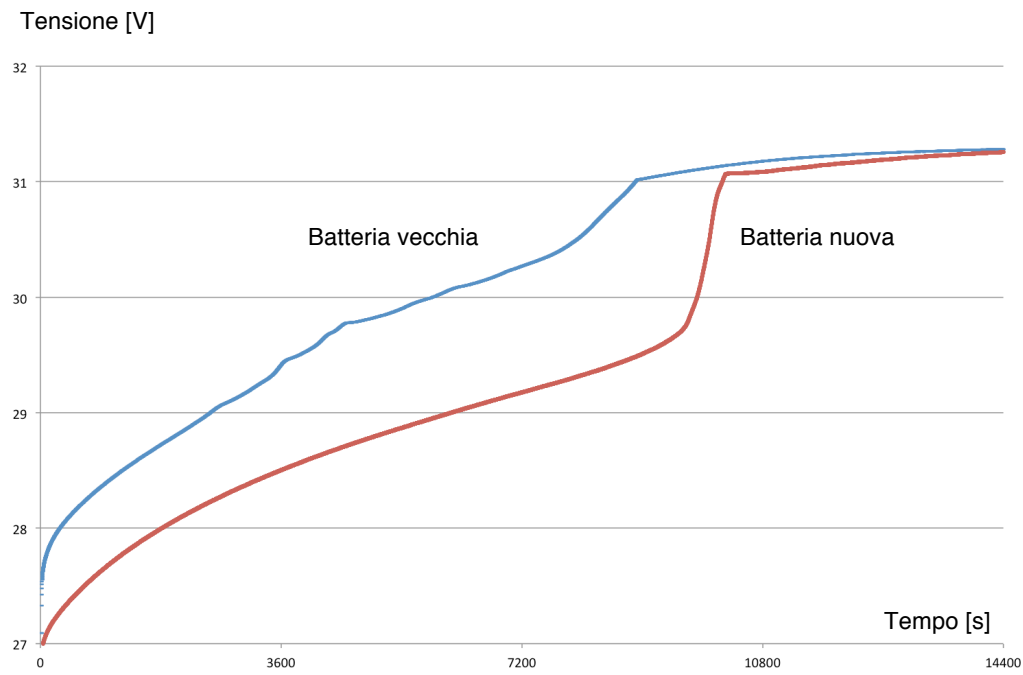


Fig. 4.14 – Fronte di salita della tensione nei due accumulatori prima della commutazione della modalità di ricarica.

È possibile osservare anche il comportamento elettrico presentato dopo la commutazione, in questo caso si studia l'evoluzione della corrente. Gli andamenti sono mostrati in Fig. 4.15, si noti come l'accumulatore nuovo sia ricaricato ad un livello di corrente più basso anche se la taratura del caricabatterie è rimasta invariata.

Per quanto riguarda l'evoluzione nel tempo della corrente, si segnala la presenza di un flesso che occorre in seguito alla commutazione ed è presente sia in Fig. 4.14 che in Fig. 4.15. Tale flesso si ha solamente per la batteria nuova.

Non è stata compiuta alcuna prova per verificare se il flesso continui a presentarsi ricaricando con i medesimi valori di corrente entrambi gli accumulatori, è quindi dubbia l'origine che potrebbe essere sia legata al caricabatterie, sia allo stato di degrado della batteria.

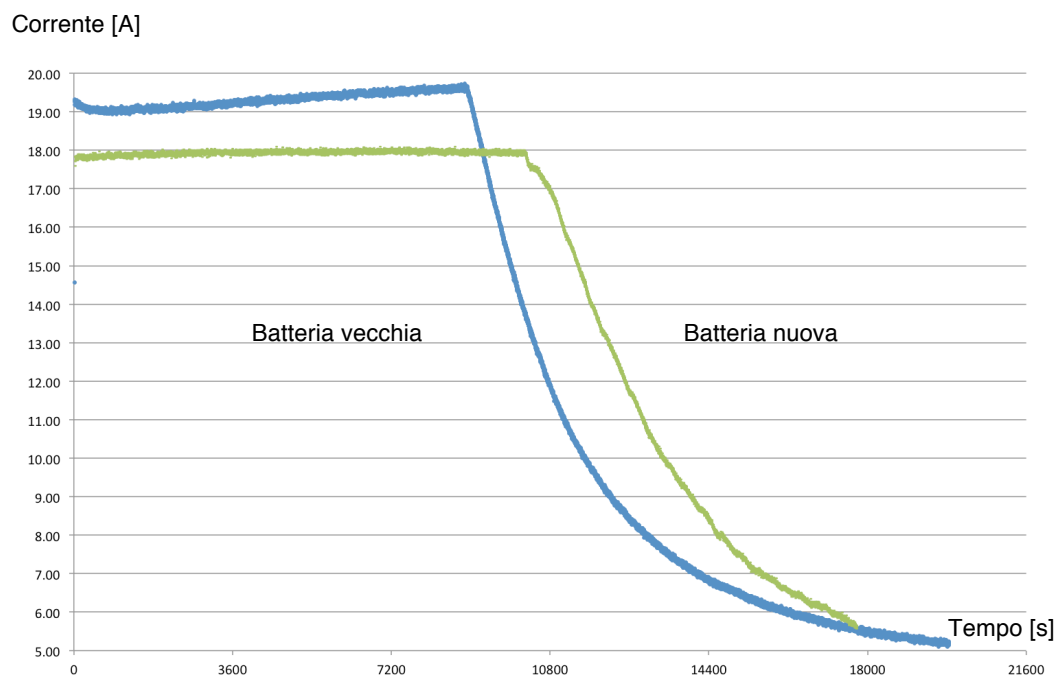


Fig. 4.15 - Fronte di discesa della corrente nei due accumulatori in seguito alla commutazione della modalità di ricarica.

CAPITOLO 5

APPROCCIO ADOTTATO

5.1 ANALISI MANUALE DELLE REGISTRAZIONI

Un'idea generale di ciò che accade a bordo locomotiva può essere ottenuta mediante STSNT, software proprietario sviluppato da Bombardier Transportation Switzerland Ltd. il quale consente di osservare l'evoluzione temporale di tutte le grandezze monitorate. Mediante STSNT sono state fatte tutte le considerazioni discusse nel Capitolo 2.5. Dopo esser state inviate a terra dal modulo MCG per la telediagnostica, le registrazioni sono convertite in un formato fruibile da STSNT (secondo i passaggi descritti nel Capitolo 6.2) e possono essere osservati gli andamenti di tutte le 73 grandezze monitorate nella locomotiva.

Selezionando le grandezze desiderate è possibile ottenere un grafico della loro evoluzione temporale, alcuni grafici ottenuti con STSNT sono già stati esposti nel Capitolo 2 in Fig. 2.7 e Fig. 2.8. Il software mette a disposizione alcuni strumenti per l'analisi. In questa fase è stata utilizzata la possibilità di scalare una grandezza e di ottenere l'andamento del prodotto di più grandezze (utilizzato per monitorare potenza in ingresso ed uscita); STSNT permette inoltre di misurare la distanza tra due punti e di tracciare la retta tangente ad una curva (calcolata nell'intorno di un numero di punti che può essere stabilito). Infine, il software consente di salvare tutte le preferenze di visualizzazione, in tal modo, una nuova registrazione può essere osservata in pochi passaggi.

L'analisi mediante STSNT consente all'operatore di percepire il reale utilizzo dell'accumulatore nella locomotiva.

Delle 73 grandezze disponibili soltanto alcune interessano lo studio della batteria, queste sono rintracciabili con i seguenti codici identificativi:

- FLG1_SpeedAct-Loco (velocità locomotiva dal modulo FLG1)
- AX05031_BATT-AX5-3-1 (tensione di batteria dal modulo AX)
- CB1_VBATCB1 (tensione di batteria dal CB1)
- CB1_IBATCB1 (corrente di batteria dal CB1)
- CB1_ITOTCB1 (corrente totale dal CB1)
- CB1_TBATCB1 (temperatura dal CB1)
- CB2_VBATCB2 (tensione di batteria dal CB2)
- CB2_IBATCB2 (corrente di batteria dal CB2)
- CB2_ITOTCB2 (corrente totale dal CB2)
- CB2_TBATCB2 (temperatura dal CB2)

Di alcune grandezze elettriche si ha una doppia lettura. Durante la maggior parte del tempo tali grandezze sono accessibili da entrambi i caricabatterie. Osservando Fig. 5.1 si nota come tensione e corrente, in doppia lettura, siano per lo più sovrapposte.

Per la presenza del diodo DA mostrato in Fig. 1.14 non è possibile leggere la tensione di batteria ogni qual volta DA sia interdetto. Questo accade durante la fase di scarica. La tensione dell'accumulatore può comunque esser letta dalle informazioni presenti in locomotiva nel modulo AX.

In riferimento a Fig. 5.1 si noti come le tensioni osservate dai due caricabatterie e quella dal modulo AX presentino una differenza, questa è la differenza di potenziale ai capi del diodo DA. La differenza di tensione è piccola quando il caricabatterie sta ricaricando l'accumulatore poiché il diodo DA è in conduzione, mentre invece è molto elevata col diodo interdetto. In questo caso la differenza tende ad esser pari alla tensione di batteria: ai capi del diodo si ha la tensione dell'accumulatore da un lato, mentre dal lato del caricabatterie si ha una tensione che in seguito ad un transitorio tende a zero. Il transitorio è dovuto al tempo che impiegano i condensatori CBF1 e CBF2 a scaricarsi, anch'essi mostrati nello schema di principio di Fig. 1.14.

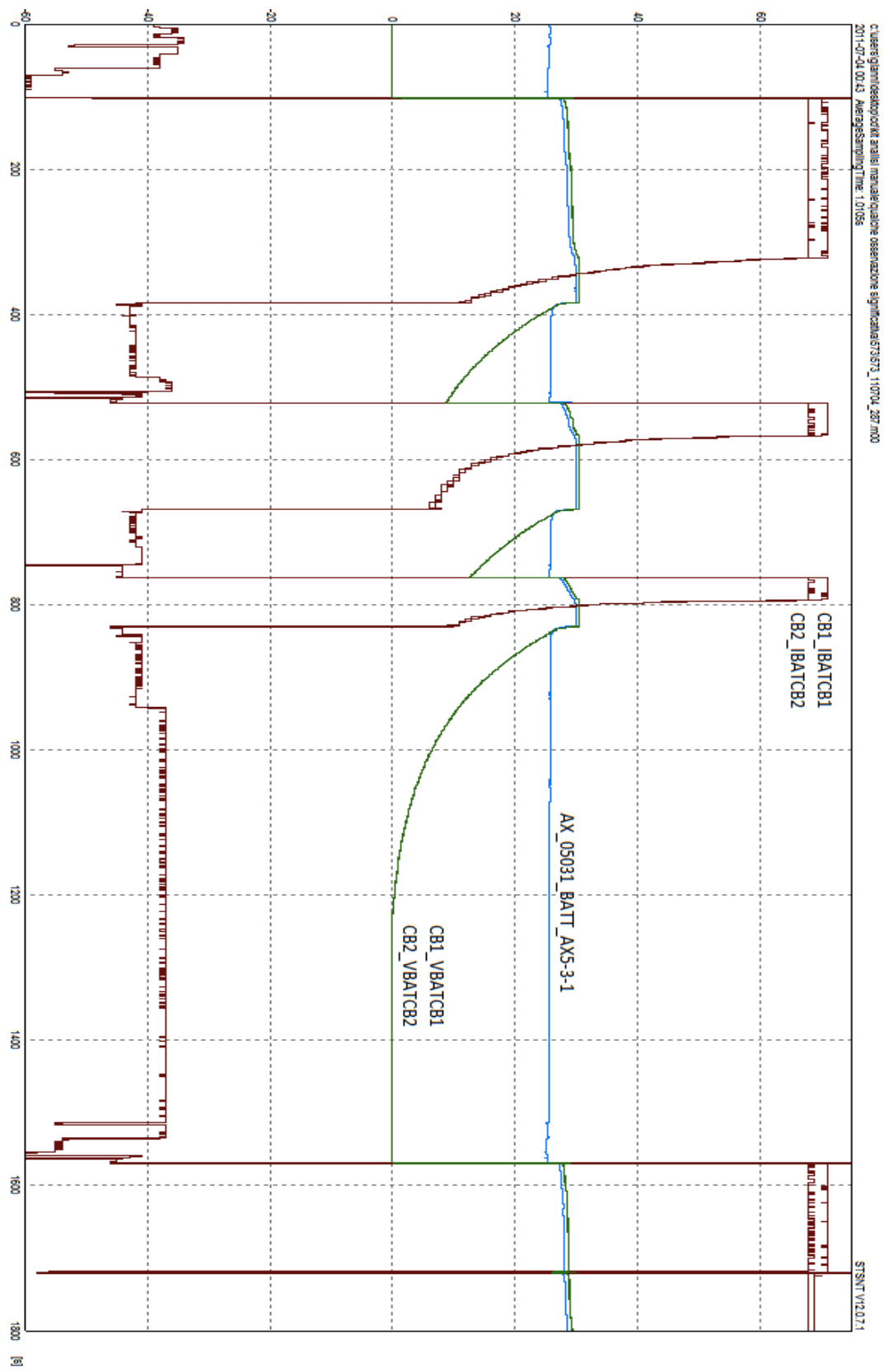


Fig. 5.1 – Serie di eventi d'utilizzo dell'accumulatore registrati da entrambi i caricabatterie

Il processo di analisi mediante STSNT com'è stato appena descritto è agevole solo quando le registrazioni da osservare sono poche, in questo caso però si hanno decine di registrazioni al giorno per ogni locomotiva e non è possibile individuare una registrazione campione che sia rappresentativa anche delle altre. Inoltre, per una corretta implementazione del CBM è necessario un monitoraggio continuo. Utilizzare STSNT ai fini della manutenzione non è agevole, l'analisi dovrebbe essere automatizzata ed è necessario adottare un approccio statistico allo studio del comportamento dell'accumulatore. È stato dunque deciso di abbandonare l'analisi mediante STSNT a favore del linguaggio di programmazione MATLAB. Con questo potente strumento ha inizio lo sviluppo di un algoritmo che tenta di automatizzare il processo di analisi per l'implementazione del CBM.

Una volta individuato il processo logico che condurrà a risultati validi non sarà esclusa la possibilità di migrazione verso altre piattaforme. In questa fase si ritiene che MATLAB possa esser lo strumento più adatto al caso.

5.2 COLLEZIONE DEGLI EVENTI

Lo scopo dell'analisi delle registrazioni è individuare il maggior numero possibile di parametri indice d'invecchiamento ed analizzarli. Si è deciso di raccogliere e collezionare eventi simili su cui effettuare considerazioni ed elaborare un algoritmo per la stima della vita residua. Si tenta quindi, di scrivere un codice in grado di selezionare tali eventi.

È necessario anzitutto unire i file contenenti le registrazioni dato che queste sono lunghe al più mezzora. Ad eccezione del caso in cui l'accumulatore si trovi a riposo, l'unione delle registrazioni consente l'analisi di eventi che sono occorsi a cavallo di più file.

Avendo a disposizione una continua evoluzione temporale delle grandezze è possibile andare ad isolare completamente degli eventi di utilizzo della batteria. S'intende utilizzare le registrazioni per estrarre alcuni parametri, in particolare si cerca di analizzare il tasso con cui la tensione di batteria decresce in relazione alla corrente di scarica ed alla tensione di fine carica imposta dal caricabatterie.

Si vorrebbero quindi collezionare episodi di scarica simili per effettuare dei confronti. Per fare ciò non basta soltanto separare, ad esempio tutti gli episodi di scarica, ma occorre collezionare quelli che hanno inizio con l'accumulatore completamente carico. È necessaria quindi un'analisi dello stato che precede l'inizio dell'evento in modo da assicurarsi che questi siano confrontabili nel tempo e per le diverse locomotive.

5.3 CURVA DI SCARICA NORMALIZZATA

5.3.1 ASPETTI GENERALI

La corrente di scarica si presenta come una grandezza che assume solo valori discreti: la sua evoluzione nel tempo non può essere apprezzata durante i transitori. Dalle registrazioni, l'inserzione di un carico è visibile come una variazione a gradino della corrente. Poiché i carichi sono noti ed inseriti con sequenze simili anche nelle diverse locomotive, la corrente si comporta come una grandezza a tratti costante quindi appare possibile collezionare episodi di scarica simili da confrontare tra loro.

Poiché la corrente si mantiene costante a tratti, allora se il confronto tra episodi avvenisse soltanto durante i tratti che presentano valori simili di corrente, si avrebbe un'interruzione precoce del confronto. Inoltre eventi che non trovano simili cui esser confrontati sarebbero scartati.

Il numero di eventi analizzati potrebbe aumentare notevolmente riuscendo a confrontare tra loro anche scariche a correnti diverse; con un confronto che invece si limita solamente al tratto in cui le correnti restano paragonabili, si ha

una perdita d'informazioni: la scarica continua mentre l'analisi termina e con essa le informazioni estratte.

Dato che gli episodi di scarica coinvolgono di per sé piccole percentuali dell'energia complessiva accumulata nella batteria, si è deciso di non spezzare tali episodi e di osservarli per intero. Inoltre, tanto maggiore è la durata dell'episodio di scarica, quanto maggiori sono le informazioni che se ne possono trarre, basti pensare che al limite, qualora l'episodio fosse la scarica completa, si potrebbe conoscere direttamente SoH (si vedano le considerazioni nel Capitolo 4.3.2).

Poiché non è semplice estrarre informazioni utili da un confronto diretto di due eventi o da un singolo evento è stato pensato di tentare un'analisi complessiva degli eventi collezionati.

Il processo di analisi che è stato deciso di seguire prevede la stima di una curva di scarica. Questa è l'andamento di tensione che presenterebbe l'accumulatore se fosse scaricato a corrente costante. Inoltre, tale scarica avrebbe inizio da accumulatore carico e mantenuto carico in tampone. La curva stimata così ottenuta consente il confronto tra diversi accumulatori ed anche di mostrare eventuali variazioni nel tempo del medesimo accumulatore. Una volta costruita tale curva, occorre individuare l'arco di tempo necessario per collezionare il numero di eventi sufficiente a tracciarla che deve essere breve in relazione alla vita dell'accumulatore. Si è deciso di tentare di ricostruire una curva di scarica alla quale nel seguito della trattazione ci si riferisce col nome di *curva di scarica normalizzata*. Il concetto è rappresentato in Fig. 5.2.

La curva stimata deve esser accompagnata da un indice di dispersione. Nell'andamento concettuale di Fig. 5.2 è tracciata la deviazione standard e che definisce le bande di confidenza nell'intorno della curva di scarica normalizzata.

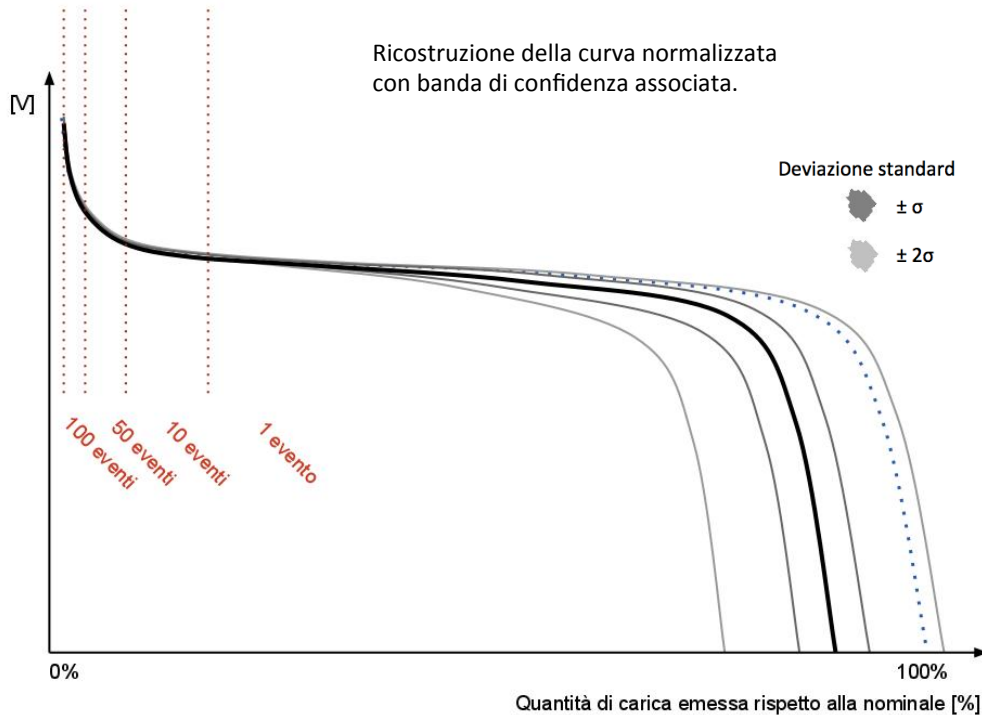


Fig. 5.2 – Andamento concettuale della tensione per la realizzazione della “curva di scarica normalizzata”

Il numero di eventi disponibili varia in relazione alla profondità della scarica, per scariche poco profonde è elevato ma cala man mano che la profondità di scarica aumenta. Le linee tratteggiate verticali di Fig. 5.2 mostrano come potrebbero esser distribuiti gli eventi a disposizione per la costruzione della curva.

5.3.2 TENSIONE AD ISTANTI PREFISSATI

La costruzione della curva di scarica normalizzata in base al valore di tensione misurato ad istanti prefissati è stato sviluppato durante i primi approcci di analisi; in quel momento era a disposizione soltanto la telediagnostica proveniente dalla E573 e con differente frequenza di campionamento. Il processo esposto nel Capitolo 6.4 è applicabile solo a tale locomotiva e solo con le registrazioni relative a quel periodo. Successivamente, quando la telediagnostica fu disponibile anche per altre locomotive, le specifiche di campionamento sono state modificate grazie ad un aggiornamento fatto su tutti

i moduli MCG installati, compreso quello della E573. In seguito all'aggiornamento si è presentato un problema legato alla bassa risoluzione nella lettura di tensione, questo ha decretato la fine dello sviluppo del metodo.

Prima della comparsa del problema era possibile misurare la tensione ad intervalli di tempo regolari (1 s, 3 s, 10 s, 30 s) e di eseguire un monitoraggio approfondito riservato alle scariche più lunghe; Il principio che era utilizzato per tracciare la curva di scarica normalizzata.

L'approccio della misura della tensione ad istanti prefissati è discusso e mostrato nella mappa concettuale in Fig. 6.12.

Poiché, in seguito all'aggiornamento di tutti i moduli non è comunque stato possibile ovviare al problema della bassa risoluzione della lettura di tensione durante la scarica, è stato deciso di cambiare metodo per la creazione della curva di scarica normalizzata.

5.3.3 TEMPO PER RAGGIUNGERE TENSIONI PREFISSATE

L'applicazione del concetto della costruzione di una curva di scarica normalizzata così com'è stato presentato trova delle difficoltà nell'implementazione. L'ostacolo più grande è dovuto all'introduzione nella locomotiva del diodo DA (v. Fig. 1.14) e discusso nel Capitolo 5.1. Questo impedisce la lettura della tensione da parte dei caricabatterie che viene quindi letta da un differente modulo con delle limitazioni: durante la scarica la risoluzione di lettura diminuisce.

Non appena la tensione dell'accumulatore scende sotto 28 V la lettura ha una risoluzione di 1 V. L'insolito comportamento è dovuto al fatto che si attinge alla tensione destinata alla segnalazione che per i vincoli imposti non può essere modificata. Si veda l'andamento mostrato in Fig. 5.3.

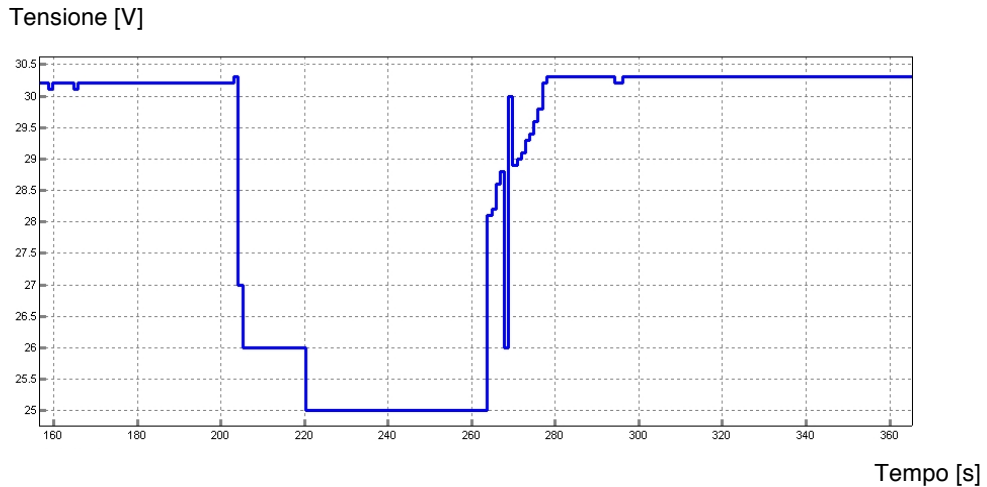


Fig. 5.3 – Tensione di batteria letta dal modulo AX durante una scarica

La creazione della curva di scarica normalizzata prosegue con delle variazioni per aggirare il problema della risoluzione. Si vuole individuare l'istante di tempo in cui ha inizio la scarica e da cui misurare quanto tempo è impiegato per raggiungere valori interi di tensione osservabili. Per ogni evento saranno individuati i tempi impiegati a raggiungere 29, 28, 27, 26, 25, 24 V e memorizzati in variabili denominate rispettivamente t_{29} , t_{28} , t_{27} , t_{26} , t_{25} , t_{24} ed ovviamente non è detto che per ogni scarica sia possibile ottenere il valore di tutte le variabili, maggiore sarà l'entità della scarica e maggiore sarà il numero di variabili note.

Con la risoluzione di lettura della tensione a disposizione, considerando l'andamento tipico riportato in Fig. 5.4 si ottiene la spezzata rappresentata in sovrapposizione, di conseguenza, le variabili rappresentative che la descrivono assumono valori proporzionali ai segmenti sottostanti le curve.

Durante l'implementazione di tale approccio si terrà conto anche della corrente di scarica, in questo modo si evita di confondere una batteria sana sottoposta ad elevate correnti di scarica con una batteria vecchia.

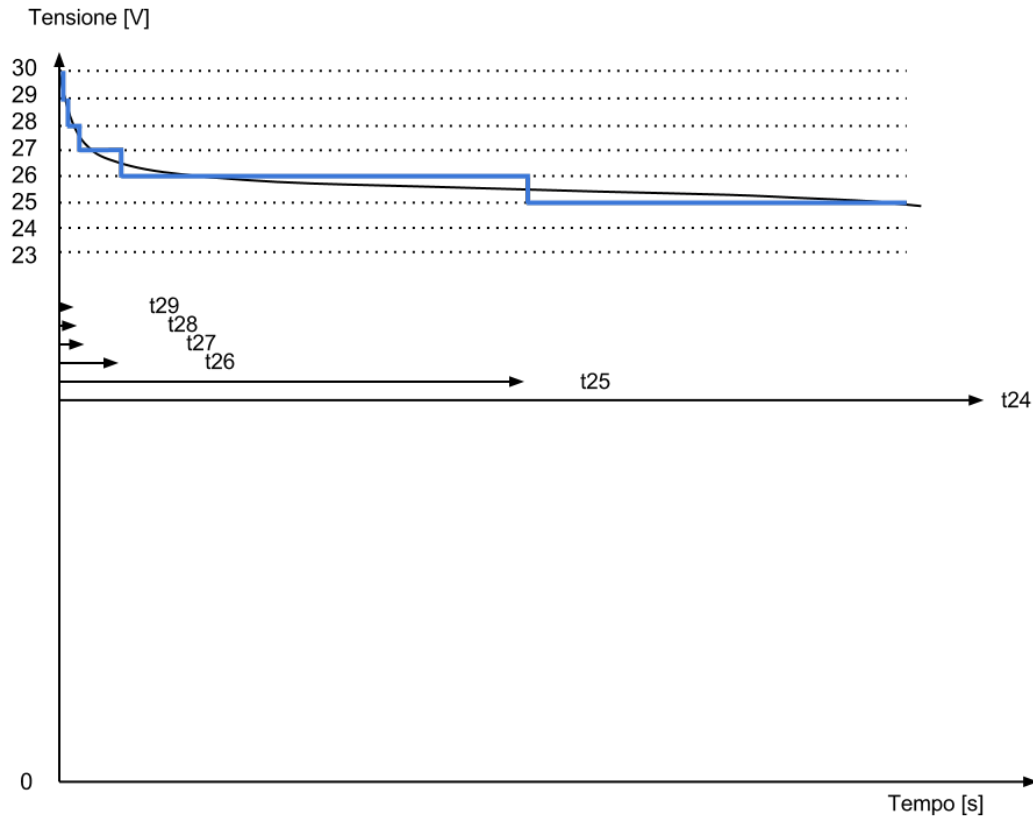


Fig. 5.4 – Tensione misurata in un andamento tipico della scarica con variabili rappresentative

Il nome *curva di scarica normalizzata* è stato scelto poiché si vuole ottenere l'andamento che la tensione avrebbe se la scarica avvenisse a valori fittizi e uguali per tutti gli accumulatori. A tal proposito è stata scelta la tensione di fine carica a 25°C e la corrente erogata pari a 45 A. In questo modo sia d'estate che d'inverno si parte da uno stesso valore di tensione di fine carica indipendente dalle condizioni climatiche poiché ricavato dalla regressione dei punti che rappresentano gli eventi. Sempre mediante regressione lineare dei punti è stato ricavato anche il resto della curva normalizzata ad una corrente di scarica pari a 45 A. Per una descrizione dettagliata del processo di ricostruzione della curva di scarica normalizzata si veda il Capitolo 6.4.

Per le limitazioni legate alla bassa entità di scarica ed alla limitata risoluzione di lettura, la costruzione della *curva di scarica normalizzata* non fornisce alcuna informazione sul punto di flesso della tensione, dato che questo se presente

risulterebbe impossibile da individuare. Analogamente avviene per il ginocchio che si ha quando la scarica sta terminando.

Nella pratica, collezionando solo i primi minuti della scarica è possibile ricostruire un andamento normalizzato che è fedele solo a questi primi istanti. Per stimare l'andamento della curva durante eventi di scarica più profondi di quelli registrati occorrerebbe tracciare la curva normalizzata per estrapolazione. A causa delle limitazioni esposte, estrapolare risulta alquanto inaffidabile.

È stato deciso di non investire molto tempo per adattare il codice scritto per la generazione della curva di scarica normalizzata valutando la tensione ad istanti prefissati; un tentativo di adattamento è stato fatto ma questo è compatibile solo con le registrazioni del periodo iniziale e solo per la E464_573, per questo motivo non sono a disposizione confronti tra curve di scarica normalizzata tra diverse locomotive. L'esito del tentativo è mostrato in Fig. 6.13.

Il tempo a disposizione è stato impiegato per tentare di implementare altri metodi di analisi quali l'analisi della fase di ricarica.

5.4 ANALISI DELLA RICARICA

Dalle prove effettuate in laboratorio, si è visto come l'istante di commutazione da carica a corrente costante a tensione costante sia anticipato in presenza di celle diversificate. S'intendono quindi ricercare delle eventuali relazioni tra il momento in cui avviene la commutazione e il degrado dell'accumulatore. Per i motivi già visti nel Capitolo 4.4 la prospettiva è di vedere le celle di una batteria invecchiare in modo differente con conseguente diversificazione delle stesse.

È possibile fornire una rappresentazione grafica di quanto detto: con riferimento a Fig. 5.5 si supponga di avere una batteria di sole tre celle simili tra loro. Si noti come la tensione durante la ricarica sia somma delle caratteristiche di ricarica delle singole celle.

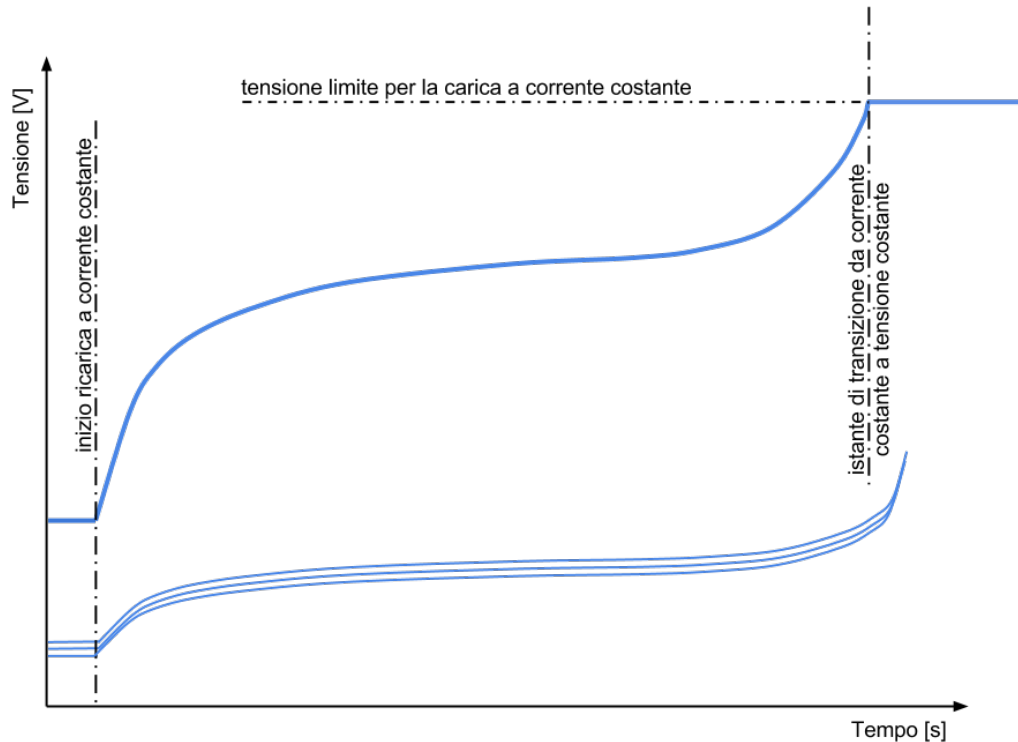


Fig. 5.5 – Andamento della tensione di batteria e della tensione di cella ipotizzata durante la ricarica a corrente costante

Si supponga ora che una di queste celle presenti capacità ridotta, in questo caso, mostrato in Fig. 5.6, la caratteristica complessiva appare differente poiché un elemento ha concluso la ricarica in anticipo. La tensione misurata dal caricabatterie raggiunge il valore di commutazione in anticipo rispetto al caso precedente. Al raggiungimento della tensione di commutazione una sola delle tre celle ha ultimato la ricarica durante la fase a corrente costante, la batteria continua ad accettare carica a lungo e fintanto che tutte le celle non abbiano completato la ricarica.

Gli esempi di Fig. 5.5 e Fig. 5.6 sono realizzati mantenendo la corrente costante, nel caso in studio però può risultare più conveniente utilizzare un approccio energetico piuttosto che temporale in modo da tenere più facilmente conto delle variazioni di corrente e delle possibili interruzioni durante la fase di ricarica.

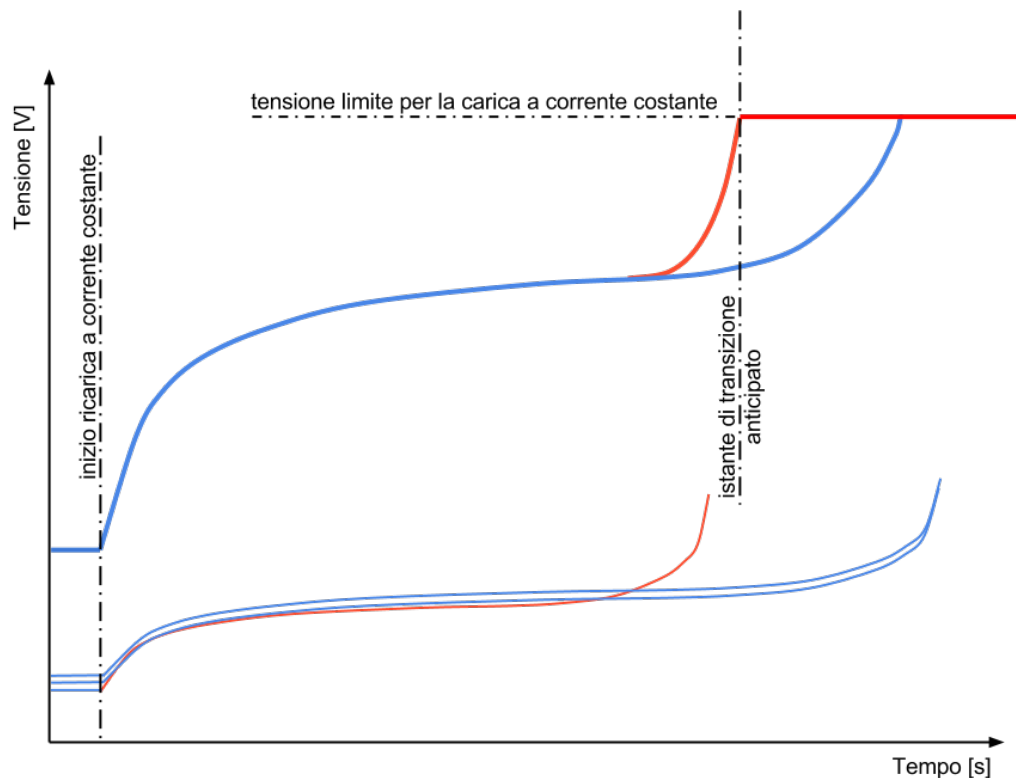


Fig. 5.6 – Andamento della tensione di batteria e della tensione di cella ipotizzata durante la ricarica a corrente costante con un elemento di capacità ridotta

Sarà ricercata una relazione che metta in risalto l'evidenza sperimentale riscontrata nelle prove di laboratorio (evidenza esposta nel Capitolo 4.4.1) osservando l'energia immessa anziché il tempo trascorso.

Si ricerca quindi una relazione tra l'energia immessa nella fase di ricarica a corrente costante e l'energia totalmente immessa durante la ricarica. Si ritiene che le evidenze emerse da un'analisi basata sul tempo trascorso possano essere estese anche all'energia fornita dal caricabatterie nelle due fasi di ricarica. L'approccio è stato sviluppato allo stesso tempo dell'algoritmo pertanto maggiori dettagli sono esposti nello specifico Capitolo 6.5.

CAPITOLO 6

ALGORITMO

6.1 ANALISI AUTOMATIZZATA

L'algoritmo che automatizza l'analisi è sviluppato in linguaggio MATLAB. Nel corso della sua creazione la precedenza è stata data alla leggibilità piuttosto che all'efficacia. Il codice è suddiviso in sezioni, chiamate anche blocchi e costituite da uno o più script, in questo modo apportare modifiche risulta semplice anche nell'ottica di sviluppi futuri.

Ogni sezione di codice è realizzata in modo da poter richiamare altri blocchi o funzioni personalizzate. Il blocco al termine dell'esecuzione genera un file di output dove sono salvate le variabili d'uscita. L'esecuzione di uno script ha inizio con la ricerca dei file contenenti le variabili necessarie alla corretta esecuzione, se tali variabili sono disponibili l'esecuzione può continuare.

Durante l'esecuzione in sequenza, può capitare che le variabili necessarie ad uno script siano immediatamente disponibili nella memoria volatile, in questo caso le variabili non vengono nuovamente caricate dal file di output, l'esecuzione complessiva è così più rapida. Nel caso in cui gli script non siano eseguiti in sequenza oppure che le variabili disponibili nella memoria volatile non siano quelle corrette per il proseguo dell'esecuzione, allora, questo è il caso in cui lo script successivo lancerà lo script di cui ha bisogno per generare il corretto file di output.

Generare file di output è un'operazione apparentemente poco utile e dispendiosa di risorse che però ha le sue ragioni: in linea di principio lo scopo di tale approccio è quello di ottenere dei blocchi in grado di richiamarsi a vicenda finché tutte le variabili necessarie non siano rese disponibili. Ad esempio, se si volesse ottenere un ipotetico parametro X della batteria si potrebbe lanciare direttamente lo script finale, cioè quello che genera tale parametro. Anche se

non ci fosse nessuna variabile disponibile, sarebbero richiamati tutti gli script necessari a generarle, si giungerebbe così nel peggiore dei casi ad un richiamo in cascata di blocchi sempre più a monte che si concluderebbe col richiamare il primo script (a sinistra in Fig. 6.1).

Richiamando di nuovo lo stesso script finale per la stima del parametro X, si otterrebbe un'esecuzione rapida dato che tutte le informazioni sono nell'ultimo file prodotto e rimasto a disposizione, il file di output era stato generato dallo script immediatamente precedente. Volendo ottenere il parametro Y si procede come già detto richiamando lo script finale che porta alla stima del parametro Y della batteria, dal richiamo in cascata sono eseguiti solo i blocchi di codice non in comune tra le due sequenze, doppiamente barrati in Fig. 6.1.

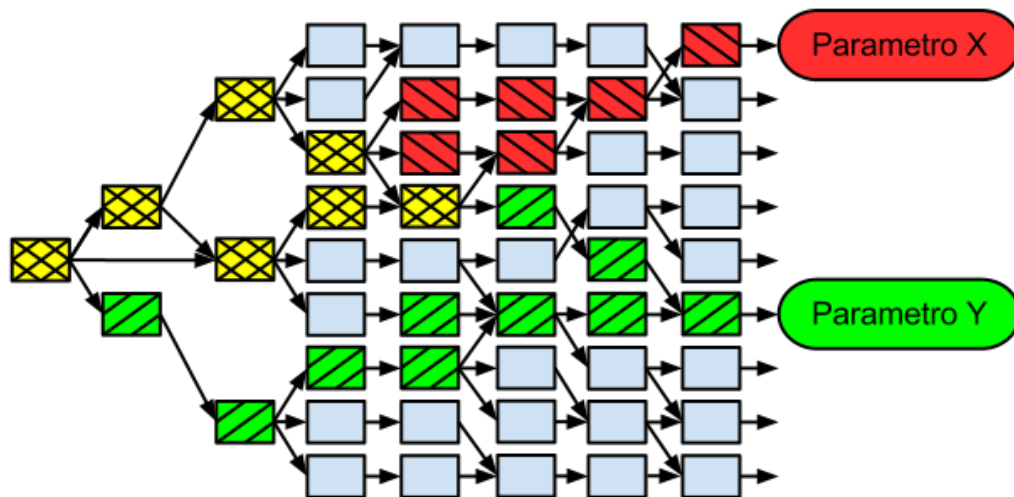


Fig. 6.1 – Concetto utilizzato per la scrittura del codice, i blocchi in giallo sono eseguiti una sola volta.

Tale approccio in fase di sviluppo presenta il vantaggio di poter sostituire un blocco con una versione migliorata dello stesso, preoccupandosi solo delle specifiche d'ingresso e di uscita. Il vantaggio principale è nella velocità, sia in fase di debugging per l'identificazione degli errori, sia durante l'esecuzione poiché non è eseguito più volte il codice non necessario.

Gli script sono salvati nel formato proprietario ".m" con nome file avente come iniziale la lettera 's' e seguito da due cifre, cifre che dipendono solo all'ordine

cronologico di creazione senza alcun riferimento all'ordine sequenziale di esecuzione (es: ".\s07.m" richiama ".\s17.m"). Qualora, per una corretta esecuzione dello script siano necessari dei parametri di taratura, questi sono inseriti in un file separato, in questo modo la ricerca è semplificata. Ad ogni script "*sXX.m*" è associato un file denominato "*presetXX.m*" contenente tutti i parametri di taratura, il quale sarà richiamato non appena verrà eseguito "*sXX.m*".

6.2 ACQUISIZIONE DATI

6.2.1 IMPORTAZIONE

Tutti i dati provenienti dalla telediagnostica della locomotiva sono a disposizione in un server *ftp* provvisorio denominato "*adamone*". Le grandezze campionate sono salvate in file con estensione .REC e compresse in formato .ZIP. Il nome del file identifica in modo univoco la provenienza (numero della locomotiva), la data e l'ora d'inizio acquisizione. Questo contiene al più mezz'ora di campionamenti di tutte le grandezze.

Una volta decompressi, i file contenenti le registrazioni sono convertiti nel formato richiesto dal software *STSNT*, si ottiene così da ogni registrazione una coppia di file con estensione .N00 e .M00. È stato scelto di conservare tali coppie di file e di dare inizio ad un'analisi automatizzata partendo da queste. Qualora necessario, tornare ad uno studio manuale mediante *STSNT* sarà più agevole.

Le fasi di download dei file .ZIP, di decompressione, di conversione e di creazione di una base dati locale sono state automatizzate mediante una serie di comandi eseguiti con un file batch e l'utilizzo di tre strumenti:

- Componente aggiuntivo *DownThemAll!* per il web browser *Firefox*;
- Software GPLed per il backup incrementale *rdiff-backup*;
- Tool aziendale per la conversione di file .REC.

L'analisi automatizzata può avere inizio copiando le registrazioni da analizzare in un'apposita cartella denominata *container* e posta nello stesso percorso da cui sono lanciati tutti gli script. Ogni script dopo esser stato lanciato genera un file dove sono salvate le variabili utili agli script successivi in linea con l'idea generale presentata nel paragrafo precedente, Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

6.2.2 SCRIPT PRIMO

Il primo script, salvato nel file denominato *s01.m*, dal percorso relativo da cui è lanciato, apre i file con estensione *.N00* e *.M00* presenti nella sottocartella "*.container*" e ne importa solo la parte utile ai fini della presente trattazione. Appena eseguito lo script carica i valori predefiniti (*preset01.m*), in questo caso soltanto percorso e nome della cartella "container". Inizialmente è estratta solo la lista dei file presenti, poi sono aperti solo i file presenti nella coppia "*nomefile.N00*" e "*nomefile.M00*", un eventuale file disaccoppiato verrà scartato. Nel caso in cui un file della coppia sia stato rinominato, esso non sarà acquisito. Nel sistema operativo *Apple Mac OS X* i file nascosti sono nominati col punto all'inizio del nome file. Questi sono generati automaticamente durante l'indicizzazione dei file di sistema. Poiché lo sviluppo è stato portato avanti anche con questo sistema operativo, è stato inserito un filtro per scartare tali file (es. "*.nomefile.X00*").

La parte centrale del primo script è il ciclo d'importazione che si ripete per ogni coppia di file presente. Il ciclo legge dal file *.N00* solo ora e data d'inizio registrazione e crea la struttura dati servendosi di una funzione creata ad hoc. Questa è denominata "*rawimporter*" ed è richiamata ricorsivamente per ogni coppia di file in "*container*". Alla funzione va passato il nome del file da aprire ed il suo percorso, questa restituisce le prime 8 colonne della struttura dati in Fig. 6.2.

Le ultime due colonne sono ricavate dal file *.N00* il quale contiene soltanto informazioni sul tipo di grandezza (consente di individuare l'intestazione delle colonne in Fig. 6.2), data e ora d'inizio registrazione.

La data è espressa nel formato AAMMGG ed il tempo è espresso in secondi a partire dalla mezzanotte, entrambi riferiti all'istante in cui la registrazione ha inizio.

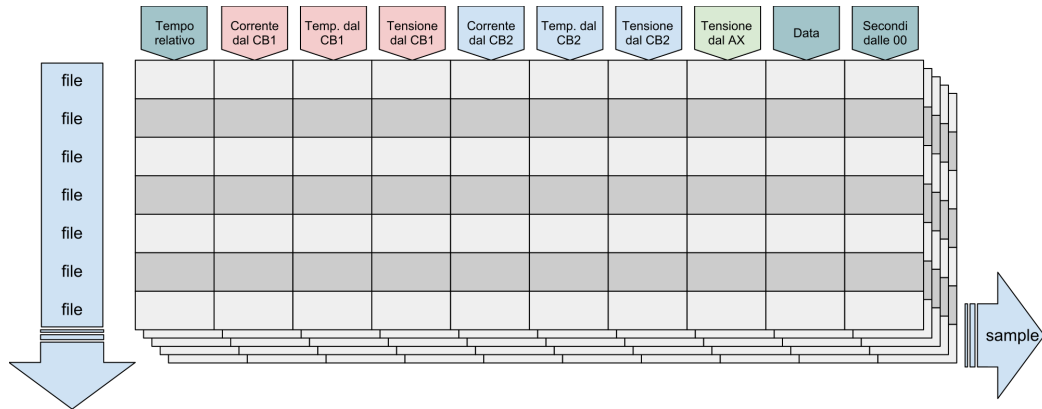


Fig. 6.2 – Organizzazione dei campionamenti nella struttura dati “C” contenente tutte le registrazioni utili presenti nei file situati in “.\container”

Il primo script termina lasciando a disposizione e scrivendo sul file "out_s01.mat" le strutture dati "list" e "C", contenenti rispettivamente la lista dei file ".M00" ed i campionamenti. Il tempo di esecuzione del primo script richiede quasi 2 minuti ogni GB di dati presenti in ".\container". Le dimensioni del file "out_s01.mat" si attestano intorno ai 4.5 MB ogni gigabyte acquisito mentre per richiamare il file, il tempo è inferiore il secondo. Ulteriori dettagli possono essere trovati in Tab. 6.1.

6.2.3 SCRIPT SECONDO

Il secondo script, s02.m ordina cronologicamente le registrazioni acquisite ed unisce quelle immediatamente successive. In questo modo gli eventi a cavallo tra due o più registrazioni risultano continui come se provenissero da un unico file e possono essere analizzati per intero. Nel file "preset02.m" è possibile impostare i secondi tollerati per l'unione di due registrazioni consecutive. Dal termine della creazione di un file all'inizio della creazione del successivo, il modulo MCG impiega un tempo variabile ma solitamente compreso tra uno e due secondi. È stato riscontrato che una tolleranza di 3 secondi assicura un buon funzionamento del processo di unione.

Tab. 6.1 – Informazioni rilevanti sui dati analizzati

Locomotiva			508	573	575	594
Inizio			05/09/2011	05/09/2011	05/09/2011	05/09/2011
Fine			24/09/2011	25/09/2011	25/09/2011	25/09/2011
Numero .REC			516	585	573	540
Size .ZIP			15,17 MB	17,20 MB	16,85 MB	15,88 MB
Size .REC			90,69 MB	102,81 MB	100,70 MB	90,90 MB
Size .M00			3,00 GB	4,10 GB	3,51 GB	3,18 GB
Dopo l'esecuzione del primo script						
Size .M			13,3 MB	17,9 MB	15,3 MB	13,5 MB
Numero serie			516	585	573	540
Tempo impiegato			5 minuti			
Dopo l'esecuzione del secondo script						
Numero serie			483	546	541	515
Tempo impiegato			10 secondi			
Dopo l'esecuzione del terzo script						
Size .M			12,7 MB	17,2 MB	14,7 MB	12,9 MB
Tempo impiegato			10 secondi			
Dopo l'esecuzione del quarto script						
Tempo impiegato			30 secondi			
Dopo l'esecuzione del quinto script						
Eventi collezionati	Scar.	CB1	75	71	92	95
		CB2	71	82	88	77
		fittizio	31	27	48	60
	Ric.	CB1	88	128	130	200
		CB2	90	124	142	174
		fittizio	133	130	130	202
	Rip.	CB1	6469	10033	7007	1147
		CB2	9975	11921	10510	8069
		fittizio	12155	5955	12337	8081

Il tempo di esecuzione per questo script è circa 100 volte inferiore al precedente. È stato creato un messaggio che informa l'utente dell'eventuale disponibilità del file di output dallo script 01. L'utente può decidere di utilizzare quel file di output anziché ripetere l'acquisizione (se i file nella cartella container sono cambiati occorre ripetere l'acquisizione). Il messaggio è creato solo se esiste un file "out_01.mat" e se le strutture dati "C" e "list" non sono immediatamente disponibili, altrimenti senza nessun messaggio dallo script 02 viene richiamato e lanciato lo script 01.

6.2.4 SCRIPT TERZO

Lo script s03.m riduce le dimensioni di "C" eliminando tre colonne, vengono mantenute solo le informazioni provenienti da uno dei due caricabatterie. La scelta può essere fatta dando in ingresso allo script la variabile CB pari ad 1 per il primo caricabatterie o pari a 2 per il secondo. Qualora non venga fornita alcuna scelta l'operatore potrà selezionare da una finestra quale caricabatterie usare per le letture. La finestra rivela la possibilità di una terza scelta che può essere attivata ponendo la variabile CB pari a 3. Con quest'opzione abilitata si uniscono le misurazioni provenienti da entrambi i caricabatterie creando una sorta di caricabatterie fittizio che opera con la seguente logica di unione: qualora le misure di tensione, corrente e temperatura non siano nulle e le correnti abbiano valori simili, si ottiene il valore medio di tutte le grandezze. Sono considerate simili misure il cui valore non differisce relativamente oltre il 10%. Qualora le misure provenienti dai due caricabatterie non siano simili, sarà presa quella avente valore assoluto maggiore, così da escludere il caricabatterie spento.

La scelta CB=3 appena descritta, introduce due vantaggi: aumenta il numero di campionamenti utili disponibili rispetto a quelli che si avrebbero osservando un solo caricabatterie ed aumenta la risoluzione delle letture³⁰. Durante lo sviluppo

³⁰ L'aumento di risoluzione è corrispondente alla possibilità di lettura nel caricabatterie fittizio di valori non misurabili direttamente da nessuno dei due caricabatterie. Ad esempio per risoluzioni in temperatura di 1.0°C potrebbe capitare di leggere 24.5° qualora siano indicati rispettivamente nei

dell'algoritmo la funzione di unione è stata mantenuta disattivata poiché rallenta il processo e, qualora sia necessario un controllo manuale, rende difficoltoso risalire alla fonte delle misure. Questa è stata riservata ai casi in cui si ricercano eventi particolarmente infrequenti. Non si esclude la possibilità che possa essere mantenuta attiva in modalità predefinita in futuro.

Per un riscontro visivo del flusso dati descritto si può far riferimento allo schema a blocchi di Fig. 6.3.

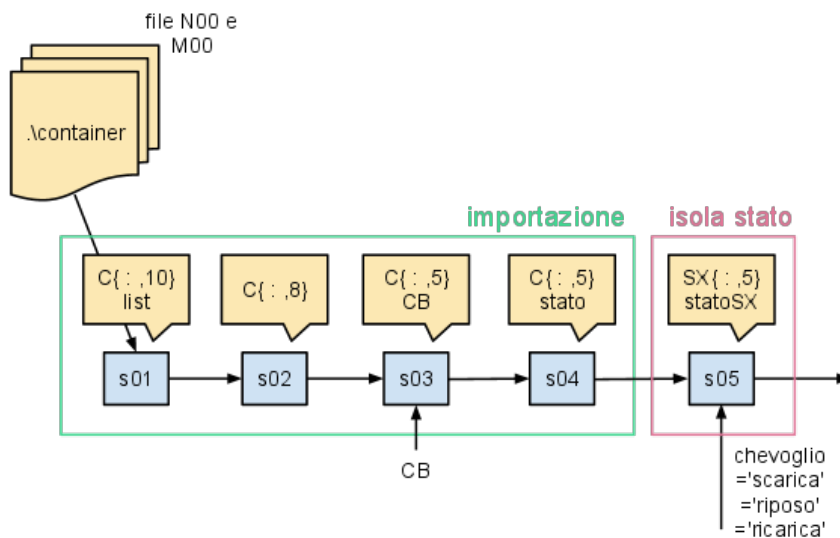


Fig. 6.3 – Schema del flusso dati nel processo d'importazione

due caricabatterie i valori 24°C e 25°C, in questo senso la risoluzione del caricabatterie fittizio può arrivare a 0.5°C.

6.3 SEPARAZIONE DEGLI STATI

6.3.1 SCRIPT QUARTO

La separazione degli stati ha inizio con s04.m che associa ad ogni serie dati un array di stato definito in base alla corrente. Lo scopo di tale script è di semplificare la lettura e l'estrazione degli stati di utilizzo della batteria (carica, scarica, riposo) in base al livello di corrente. In uscita fornisce la struttura dati "stato" costituita da un cell array dove ogni elemento può assumere uno dei seguenti valori:

- 4 carica a I costante
- 3 carica a V costante
- 2 carica a V costante, sotto i 5A
- 1 riposo, corrente $1 \leq I \leq -1$
- 0 non utilizzato, impossibile
- -1 scarica piccola, fino a -5A
- -2 scarica media, fino a -50A
- -3 scarica grande, fino a -70A
- -4 scarica eccessiva, oltre -70A

Lo stato è analizzato istante per istante e viene riconosciuto osservando l'output da script 04 in relazione agli stati desiderati memorizzati nelle variabili att1, att2 ed att3.

6.3.2 SCRIPT QUINTO

Il blocco di separazione degli stati è in grado di restituire solo le serie di dati in cui la batteria si sta comportato come richiesto. Esso va richiamato dando in ingresso lo stato desiderato e questo isola le serie di campioni che soddisfano la richiesta.

Come per gli script precedenti anche s05.m ha il relativo file preset05.m richiamato durante l'esecuzione. In questo caso la richiesta dello stato da isolare può essere effettuata attraverso la variabile *chevoglio*, contenente una stringa di caratteri. Le stringhe riconosciute come ingresso sono *ricarica*,

scarica e riposo. Ad esempio, richiamando *s05.m* con *chevoglio='scarica'* sarà lanciato *preset05.m* a cui è passata la stringa '*scarica*'. Questo provvede a fornire le specifiche che dovrebbe avere la serie da isolare valutata anche in base allo stato della serie che la precede. In pratica, per isolare un evento di scarica si vuole che questa sia preceduta da uno stato di riposo. In questo modo si analizzano soltanto gli eventi di scarica che hanno inizio ad accumulatore carico. Le serie dati che non rispettano le specifiche richieste sono scartate, analogamente per le serie dati ritenute troppo brevi.

Lo stato di riposo isola solo gli istanti in cui il caricabatterie eroga meno di un ampere, per tale valore la carica può considerarsi conclusa. Si noti che con il caricabatterie sempre in funzione non si può ottenere la tensione che la batteria presenterebbe a vuoto: il caricabatterie nel funzionamento in tampone impone la tensione in funzione della temperatura ambientale come mostrato in Fig. 1.13. Analizzando la tensione negli istanti in cui l'accumulatore si trova nello stato 1 e collezionati negli istanti che precedono la scarica si ottiene quanto rappresentato in Fig. 6.4. La regressione lineare dei punti sperimentali coincide con le specifiche dichiarate.

Si noti la differenza tra la tensione misurata dal caricabatterie rispetto a quella misurata dal modulo AX. Quest'ultima letta direttamente ai capi della batteria è la tensione che è stata presa a riferimento per la creazione della curva di scarica normalizzata. La tensione letta dal caricabatterie appare maggiorata poiché è somma della tensione di batteria e della caduta sul diodo DA (mostrato in Fig. 1.14) il quale influenza anche la lettura di tensione durante la scarica come evidenziato nel Capitolo 5.1.

Lo stesso scostamento si riscontra anche nelle altre locomotive. In Fig. 6.5 è mostrata la tensione di fine carica riscontrata dalle registrazioni provenienti dalla locomotiva E464_594.

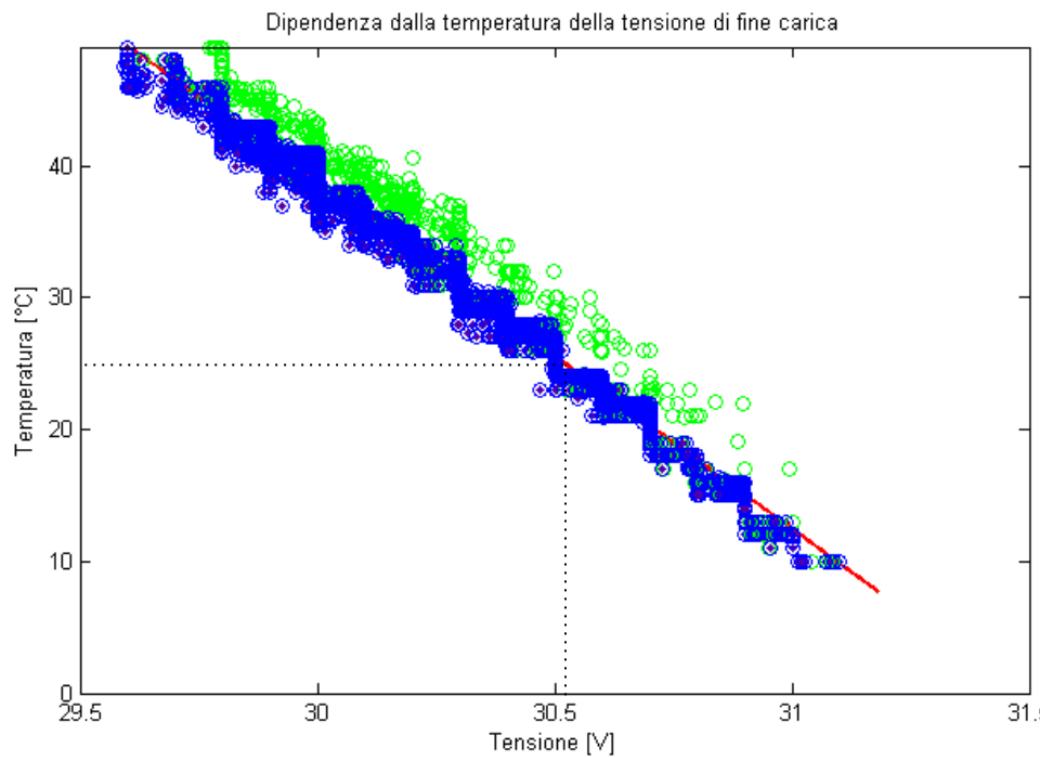


Fig. 6.4 – Dipendenza dalla temperatura della tensione di fine carica, misurata dal CB1 (chiaro), modulo AX (scuro) per la locomotiva E464_508

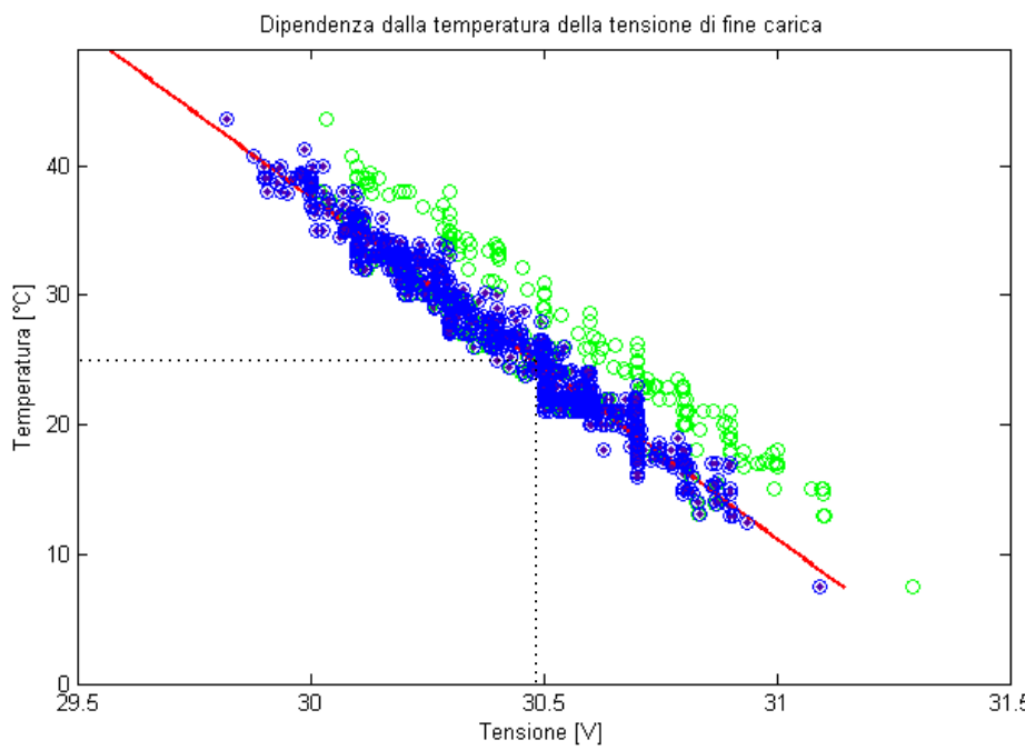


Fig. 6.5 – Dipendenza dalla temperatura della tensione di fine carica, misurata dal CB1 (chiaro), modulo AX (scuro) per la locomotiva E464_594

Lo script “s05.m” opera grazie alla riduzione di dimensioni delle serie dati permessa da quattro funzioni create ad hoc per elaborare le scariche quali:

```
function [ SX ] = tagliafine( C, min, max, sample )
```

- "tagliafine" Tronca la fine della serie di dati se questa permane nel range imposto;

```
function [ SX ] = tagliainizio( SX, min, max, sample, Lmin )
```

- "tagliainizio" Tronca l'inizio se questo è compreso tra due valori di corrente (eccetto i primi 3 secondi di campionamenti necessari ad individuare la tensione di fine carica e tracciare le regressioni di Fig. 6.4);

```
function [ SX ] = tagliacorte( SX, Lmin )
```

- "tagliacorte" Elimina le serie più corte del valore imposto;

```
function [ SX ] = tagliuzza( SX, min, max, sample, Lmin)
```

- "tagliuzza" Separa la serie non appena individua lo stato 1 (esclusi i primi 3 secondi di campionamenti).

Le funzioni sono richiamate nell'ordine con cui sono state presentate ed ogni volta che sono lanciate il tempo di esecuzione della funzione successiva è inferiore rispetto alla funzione precedente poiché ad essere scartati sono gli stati di inutilizzo, stati in cui la batteria si trova ad operare nella maggior parte del tempo e che quindi costituiscono un'enorme mole di dati.

Una volta lanciata l'ultima funzione, le precedenti sono rilanciate nello stesso ordine al fine di creare serie simili e confrontabili³¹.

³¹ Il motivo può essere facilmente compreso con un esempio: consideriamo una serie di dati di un'ora in cui ogni 10 minuti si ha un cambio stato e nel seguente ordine si hanno le fasi di:

inutilizzo; scarica; ricarica; inutilizzo; scarica; ricarica.

Per le serie nell'ordine presentato si hanno due episodi di scarica della batteria, lanciare le quattro funzioni ("tagliafine", "tagliainizio", "tagliacorte", "tagliuzza") una sola volta eliminerebbe solo i primi 10 minuti e l'ultima funzione dividerebbe la serie dati in due serie, di cui una include lo stato di riposo. Lanciando lo script due volte ci si assicura di avere la separazione in due serie e l'eliminazione di entrambi gli stati di riposo.

Per comodità, pochi campionamenti dello stato di riposto sono stati mantenuti: con questi è possibile avere un riferimento relativo alle condizioni da cui la scarica ha inizio. Sono mantenuti i primi 8 campionamenti appartenenti allo stato di riposo, riferimento con cui è stato possibile ricavare Fig. 6.4 e Fig. 6.5.

Lo script termina lasciando a disposizione e salvando nel relativo "out_s05.mat" le serie di registrazioni in "SX" e lo stato che si è isolato in "chevoglio".

Si noti che la struttura dati SX è simile a C dove ogni riga è una registrazione (file o unione di più file), come mostrato in Fig. 6.2, mentre in SX è un evento selezionato: gli eventi possono anche provenire da una stessa registrazione ma questi appaiono separati in righe diverse.

In Fig. 6.6 è mostrato lo script s05.m interrotto dove necessario per alcuni commenti.

```

1  %-----%
2  % %-----%
3  % %
4  % %          Separa          %
5  % %
6  % %-----%
7  %-----%
8
9  -
10 -
11 -
12 -
13 -
14 -
15 -
16 -
17 -
18 -
19 -
20 -
21 -
22 -
23 -
24 -
25 -
26 -
27 -

```

```

clc;
if exist('C') && exist('stato')
elseif exist('out_s04.mat')>0
    load out_s04;
else run s04;
end

if exist('chevoglio')
else
    chevoglio='scarica';
end

run preset05;

% Vengono definite tre memorie temporanee per memorizzare la posizione
% degli stati precedenti
mem1=0;    mem2=0;    mem3=0;    mem4=0;

switch chevoglio

```

Fig. 6.6 – Codice dello script quinto “s05.m”, righe 1-27

Nel caso in cui la batteria si trovi a riposo, è eseguito il codice in Fig. 6.7 e Fig. 6.8. Fig. 6.7 individua gli estremi degli stati trovati nei campionamenti, mentre

in Fig. 6.8, usando gli estremi come indice, si ricompone una struttura dati ordinata contenente solo stati di riposo. Dalla riga 40 ha inizio il ciclo che realizza la struttura dati SX e questo si ripete per ogni file analizzato. È un ciclo *for* che include un ciclo *while* all'interno del quale vengono effettuati controlli sullo stato da isolare e sullo stato precedente su tutti i campionamenti disponibili.

```

28 -         case 'riposo'
29 -         run preset05;
30 -         %lo script03 garantisce che le serie di dati continue sono unite in un
31 -         %unica serie di acquisizioni. Ogni riga di C è una serie di dati che può
32 -         %contenere varie sotto-serie.
33 -         %Si vogliono ora separare le sotto-serie di dati appartenenti ad uno stesso
34 -         %stato, si vuole inoltre poter distinguere quelle che sono state precedute
35 -         %da un determinato stato precedente (es: da batteria carica "2" si
36 -         %vogliono isolare gli eventi di scarica "-2" o "-3" o "-4").
37 -
38 -         sC=size(stato);
39 -         r=1;
40 -         for i=1:sC(1)
41 -             sC_i=size(stato{i,1});
42 -             j=4;
43 -             while j<sC_i(1)
44 -                 % se si vuole osservare anche uno stato precedente
45 -                 if pre1~=0 || pre2~=0 || pre3~=0
46 -                     % memorizza il punto iniziale e finale del ciclo precedente
47 -                     if stato{i,1}(j-3)==pre1 || stato{i,1}(j-3)==pre2 || stato{i,1}(j-3)==pre3
48 -                         if mem3==0
49 -                             mem3=j-3;
50 -                             mem4=0;
51 -                         end
52 -                         elseif mem4==0 && mem3~=0
53 -                             mem4=j-3;
54 -                         end
55 -                     end
56 -
57 -                     if (pre1==0 || pre2==0 || pre3==0) || mem4>mem3
58 -                         % memorizza il punto iniziale e finale del ciclo attuale
59 -                         if stato{i,1}(j)==att1 || stato{i,1}(j)==att2 || stato{i,1}(j)==att3
60 -                             if mem1==0
61 -                                 mem1=j; % memoria inizio serie
62 -                             end
63 -                             elseif mem1~=0
64 -                                 mem2=j-1;
65 -                             end
66 -                         end
67 -
68 -                         j=j+1;
69 -                     end

```

Fig. 6.7 - Codice dello script quinto "s05.m", righe 28-69

```

70
71 % scrive la serie di dati in SX
72 if mem1~=0 && mem2~=0
73     if mem2-mem1>(21) % <--- si prendono solo serie maggiori di N ca
74         if mem3<mem4 && mem3<mem2
75             for k=1:5
76                 SX{r,k}=C{i,k}(mem3:mem2); %sostituire mem3 con mem1
77             end
78             statoSX{r,1}=stato{i,1}(mem3:mem2);
79             r=r+1;
80             mem1=0;
81             mem2=0;
82             mem3=0;
83             mem4=0;
84         elseif pre1==0 && pre2==0 && pre3==0
85             for k=1:5
86                 SX{r,k}=C{i,k}(mem1:mem2);
87             end
88             statoSX{r,1}=stato{i,1}(mem1:mem2);
89             r=r+1;
90             mem1=0;
91             mem2=0;
92             mem3=0;
93             mem4=0;
94         end
95     else
96         mem1=0;
97         mem2=0;
98         mem3=0;
99         mem4=0;
100     end
101 end
102 end
103 end

```

Fig. 6.8 - Codice dello script quinto "s05.m", righe 70-103

Il ciclo *while* include dei controlli per annotare l'inizio e la fine della serie dati che tra cui è compreso l'evento da isolare e successivamente, prima di ripetersi per l'evento successivo, partendo dagli estremi annotati crea una riga della struttura SX. Gli eventi composti da meno di 21 sample sono scartati.

Oltre la riga 103, la creazione della struttura dati SX (nel caso sia richiesto lo stato di *riposo*) è completa. Le parti che seguono sono eseguite solo se è richiesta una *scarica* oppure una *ricarica* poiché sono eseguite dalla funzione *switch*.

In Fig. 6.9 è mostrato il codice eseguito nel caso che gli eventi da selezionare sono scariche.

```

105 -         case 'scarica'
106 -
107 -         % Accorcia alla fine di ogni serie,
108 -         % risalendo la serie dalla fine se la corrente è nel range -5, 5
109 -         % taglia non appena si esce dal range
110 -         SX=tagliafine(C,-5,2,0);
111 -
112 -         % Accorcia all'inizio di ogni serie,
113 -         % se la corrente è nel range -5, 5
114 -         % se tale stato è mantenuto per almeno 3 secondi
115 -         % se la serie finale è lunga almeno 6 secondi
116 -         SX=tagliainizio(SX,-5,5,3*8,3*8+3*8);
117 -
118 -         % Divide una serie in tante serie quanti sono gli stati di separazione
119 -         % raggiunti: range -2, 2, mantenuto per almeno 1 secondo
120 -         SX=tagliuza(SX,-5,2,1*8,1*8+3*8);
121 -
122 -         % Accorcia all'inizio di ogni serie,
123 -         % se la corrente è nel range -5, 2
124 -         % se tale stato è mantenuto per almeno 1 secondi
125 -         % se la serie finale è lunga almeno 4 secondi
126 -         SX=tagliainizio(SX,-5,2,1*8,1*8+3*8); %<-----riprendi per le scarich
127 -         % carica
128 -
129 -         % Accorcia alla fine di ogni serie,
130 -         % risalendo la serie dalla fine se la corrente è nel range -5, 2
131 -         % taglia non appena si esce dal range
132 -         SX=tagliafine(SX,-5,2,0);
133 -
134 -         % Elimina le serie più corte di 2 secondi
135 -         SX=tagliacorte(SX,2*8);
136 -
137 -         % Elimina le serie se la media delle correnti nel primo secondo è fuori dal
138 -         % range +1, -1
139 -         sX=size(SX);
140 -         i=1;
141 -         while i<=sX(1)
142 -             if mean(SX{i,2}(1:8))>-1 && mean(SX{i,2}(1:8))<1
143 -                 i=i+1;
144 -             else
145 -                 SX(i,:)=[];
146 -                 sX=size(SX);
147 -             end
148 -         end
149 -
150 -         % Elimina le serie se la media delle correnti nel primo secondo di scarica
151 -         % è più bassa di 30 A
152 -         sX=size(SX);
153 -         i=1;
154 -         while i<=sX(1)
155 -             if mean(SX{i,2}(8:16))<-30
156 -                 i=i+1;
157 -             else
158 -                 SX(i,:)=[];
159 -                 sX=size(SX);
160 -             end
161 -         end

```

Fig. 6.9 - Codice dello script quinto “s05.m”, righe 105-161

Per isolare gli episodi di scarica sono utilizzate le funzioni "tagliafine", "tagliainizio", "tagliacorte" e "tagliuzza" introdotte all'inizio di questo paragrafo. Le prime tre sono subito lanciate nuovamente per il motivo esposto nella nota 31. Tra le righe 139 e 152 sono presenti due filtri per migliorare la qualità degli eventi selezionati che intervengono in base alla corrente:

- sono eliminate le serie che nel secondo che precede la scarica non si trovano nello stato 1 (poiché alterano i primi istanti della scarica);
- sono eliminate le serie con corrente iniziale inferiore 30 A (conducono a lente evoluzioni di tensione, poiché rare, l'algoritmo non è stato pensato per monitorarle).

```

163 -         case 'ricarica'
164 -             run preset05;
165 -             sC=size(stato);
166 -             r=1;
167 -             for i=1:sC(1)
168 -                 sC_i=size(stato{i,1});
169 -                 j=4;
170 -                 while j<sC_i(1)
171 -                     % se si vuole osservare anche uno stato precedente
172 -                     if pre1~=0 || pre2~=0 || pre3~=0
173 -                         % memorizza il punto iniziale e finale del ciclo precedente
174 -                         if stato{i,1}(j-3)==pre1 || stato{i,1}(j-3)==pre2 || stato{i,1}(j-3)==pre3
175 -                             if mem3==0
176 -                                 mem3=j-3;
177 -                                 mem4=0;
178 -                             end
179 -                             elseif mem4==0 && mem3~=0
180 -                                 mem4=j-3;
181 -                             end
182 -                         end
183 -
184 -                     if (pre1==0 || pre2==0 || pre3==0) || mem4>mem3
185 -                         % memorizza il punto iniziale e finale del ciclo attuale
186 -                         if stato{i,1}(j)==att1 || stato{i,1}(j)==att2 || stato{i,1}(j)==att3
187 -                             if mem1==0
188 -                                 mem1=j; % memoria inizio serie
189 -                             end
190 -                             elseif mem1~=0
191 -                                 mem2=j-1;
192 -                             end
193 -                         end
194 -                     end
195 -
196 -                     j=j+1;

```

Fig. 6.10 - Codice dello script quinto "s05.m", righe 163-196

Oltre riga 161 (in Fig. 6.9) è terminata la creazione della struttura dati SX nel caso si voglia isolare la *scarica*. Per collezionare eventi di *ricarica* è invece eseguito il codice da riga 163 a 234 mostrato in Fig. 6.10 e Fig. 6.11. Il criterio di selezione è analogo a quello utilizzato per lo stato di riposo: il codice in Fig. 6.10 individua gli estremi della serie ricercata, quello in Fig. 6.11 compone la struttura dati SX.

```

198 % scrive la serie di dati in SX
199 if mem1~=0 && mem2~=0
200     if mem2-mem1>(21) % <--- si prendono solo serie maggiori di N c
201         if mem3<mem4 && mem3<mem2
202             for k=1:5
203                 SX{r,k}=C{i,k}(mem3:mem2); %sostituire mem3 con mem
204             end
205             statoSX{r,1}=stato{i,1}(mem3:mem2);
206             r=r+1;
207             mem1=0;
208             mem2=0;
209             mem3=0;
210             mem4=0;
211         elseif pre1==0 && pre2==0 && pre3==0
212             for k=1:5
213                 SX{r,k}=C{i,k}(mem1:mem2);
214             end
215             statoSX{r,1}=stato{i,1}(mem1:mem2);
216             r=r+1;
217             mem1=0;
218             mem2=0;
219             mem3=0;
220             mem4=0;
221         end
222     else
223         mem1=0;
224         mem2=0;
225         mem3=0;
226         mem4=0;
227     end
228 end
229 end
230 end
231
232 end
233 clearvars -except statoSX SX p chevoglio;
234 save out_s05;

```

Fig. 6.11 - Codice dello script quinto "s05.m", righe 198-234

6.4 COSTRUZIONE DELLA CURVA DI SCARICA NORMALIZZATA

Per la costruzione della curva di scarica normalizzata sono stati utilizzati molteplici script. Questi non saranno descritti nel dettaglio com'è stato fatto per "s05.m" ma soltanto dal punto di vista funzionale. Una mappa del flusso dati per la creazione della curva è mostrata in Fig. 6.12.

Il flusso dati va da destra verso sinistra ma il primo blocco ad essere eseguito può anche essere quello più a destra. Il blocco di *ricostruzione della curva di scarica* richiama in quest'ordine s09, s18, s10, s12, s14 e s16, ognuno di questi richiama rispettivamente s08, s17, s07, s11, s13 e s15 che a loro volta richiamano i blocchi più a sinistra.

Il blocco che isola la tensione di fine carica è il primo ad essere lanciato. Questo produce i grafici in Fig. 6.4 e Fig. 6.5 consentendo di individuare la tensione di fine carica che si avrebbe ad una temperatura ambiente di 25°C. Per le locomotive 508 e 594, in base alle registrazioni esaminate si attesta rispettivamente a 30,52 e 30,48 V. Per la locomotiva 573, di cui è tracciata la curva di scarica normalizzata (in Fig. 6.13), la tensione è pari a 30,13 V ed è visibile dalla curva stessa.

In riferimento a Fig. 6.12 è possibile notare che sopra ad ogni script sia presente il nome delle variabili lasciate a disposizione e presenti nel relativo file out_sXX.m, queste consentono di velocizzare gli script successivi. Prima di fornire un risultato e qualora non siano disponibili dati salvati, s05 impiega molto tempo (si veda Tab. 6.1) e viene richiamato due volte, una per isolare la scarica (quando richiamato da s09) e un'altra per isolare la scarica (quando richiamato da script 17). A questo punto lo script 17 lascia a disposizione su S1 le serie troncate ad un secondo e quelle che durano almeno un secondo su SX. Quando s17 è nuovamente richiamato da s07 saranno riprese da SX solo le serie che durano almeno tre secondi e salvate su S3. A questo punto SX è modificato e contiene solo serie che durano almeno 3 secondi. Analogamente con gli script s11, s13, s15.

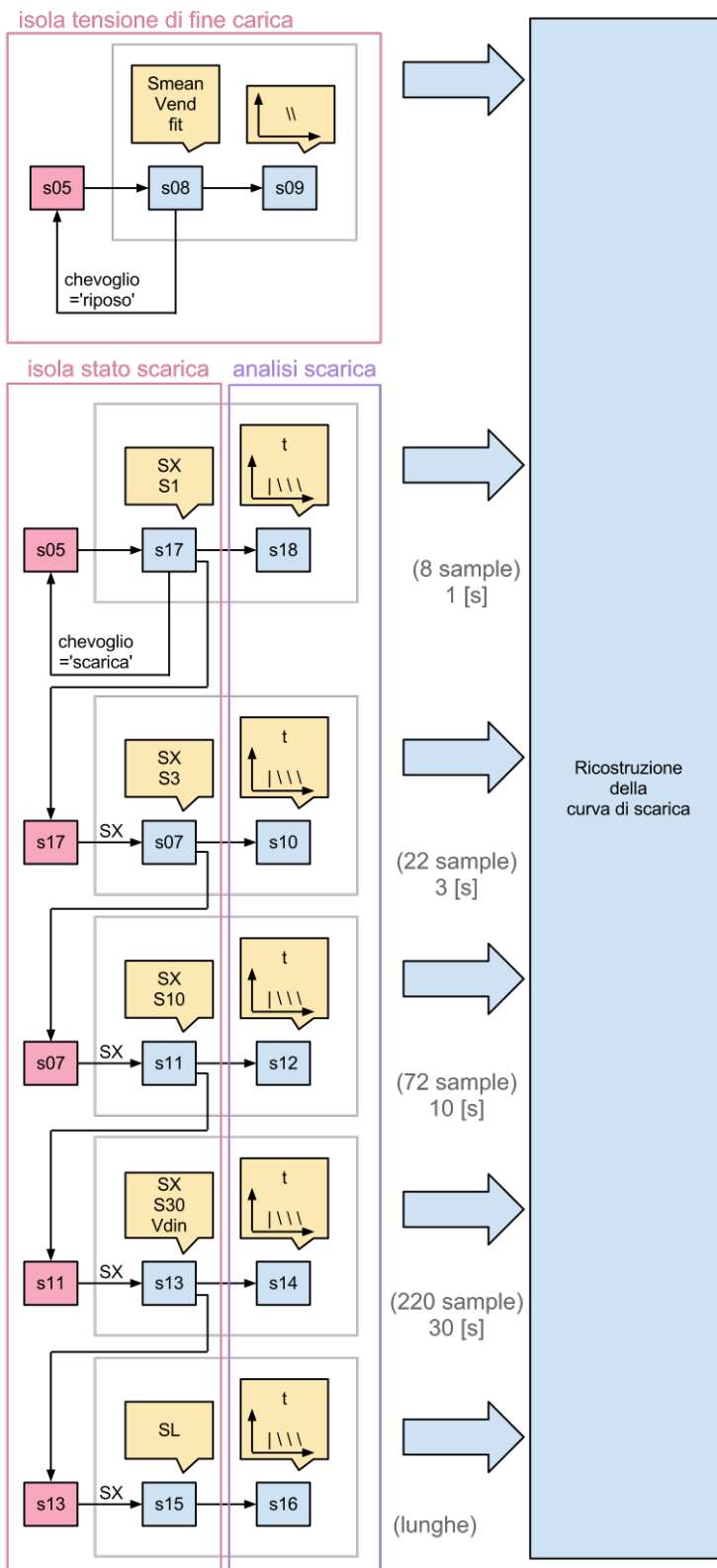


Fig. 6.12 – Mappa degli script utilizzati per la costruzione della curva di scarica normalizzata (versione introdotta nel Capitolo 5.3.2)

In Fig. 6.12 la mappa degli script mostra il flusso dati in riferimento alla prima versione della ricostruzione della curva di scarica normalizzata, ossia quella introdotta nel Capitolo 5.3.2. Sotto invece è mostrato l'andamento ottenuto con l'approccio introdotto in Capitolo 5.3.3. il flusso dati che lo realizza non è automatizzato come nel caso precedente poiché lo sviluppo dell'algoritmo è stato interrotto per dedicare maggiori attenzioni alla ricerca di altre grandezze.

La Fig. 6.13 è composta da due grafici, il primo (parte superiore) è un grafico a dispersione dove sono presenti tre famiglie di punti, distinti coi simboli "+", "x" e "o". Ogni evento di scarica può generare al più tre punti, uno per ogni famiglia. La prima famiglia di punti è generata dalle scariche che fanno scendere la tensione di batteria almeno sotto i 27 V, la seconda almeno sotto i 26 V e la terza famiglia almeno sotto i 25 V. Di ogni evento si valuta il tempo impiegato dalla tensione a scendere sotto un determinato valore di soglia (come mostrato nel Capitolo 5.3.3). per questo grafico sono stati considerati soltanto tre valori di tensione (27, 26 e 25 V). I punti nel grafico a dispersione possono essere individuati dall'istante in cui è raggiunta la tensione di soglia e dalla corrente media valutata dall'inizio della scarica (tempo zero).

Una volta ottenute le tre famiglie di punti è stata tracciata una regressione lineare per ognuna di queste a cui riferirsi per normalizzare in base alla corrente. Il valore scelto per la normalizzazione è 45 A, rintracciabile in Fig. 6.13 per il segmento orizzontale che interseca le tre regressioni. Da ogni intersezione partono tre segmenti che cadono perpendicolari sull'asse dei tempi individuando tre valori. Questi sono i tempi stimati che impiegherebbe l'accumulatore in esame a raggiungere i prefissati valori di tensione se fosse scaricato a corrente costante pari a 45 A. Pertanto è possibile tracciare il secondo grafico (parte inferiore) con la sola aggiunta della tensione iniziale normalizzata a 25°C (si veda Fig. 6.4 e Fig. 6.5) per individuare il primo tratto (orizzontale). Nella locomotiva E464_573 analizzando tutte le registrazioni che portano alla creazione della Fig. 6.13, la tensione di fine carica normalizzata a 25°C è pari a 30,52 V.

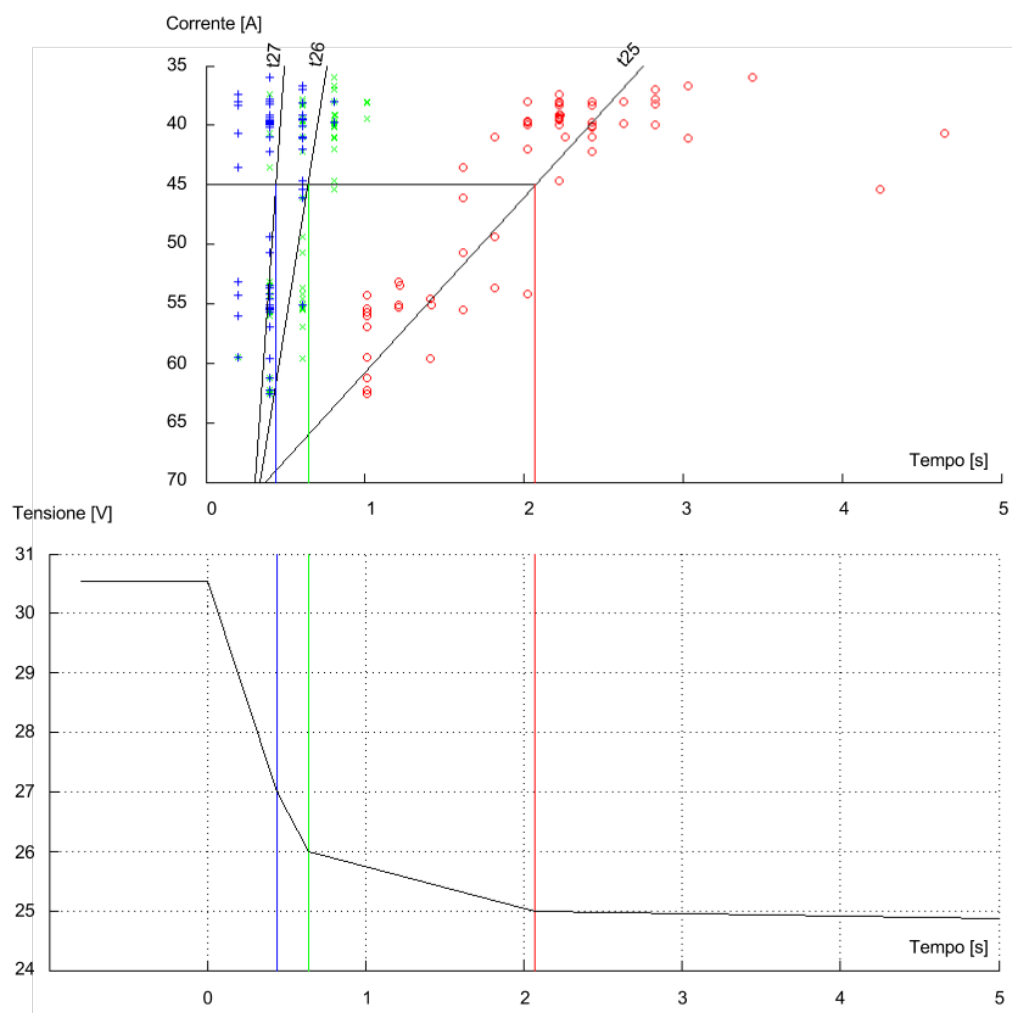


Fig. 6.13 – Curva di scarica normalizzata ricostruita per l'accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_573

6.5 ANALISI DELLA RICARICA

L'analisi della ricarica consiste nel ricercare le evidenze riscontrate nei test di laboratorio anche nelle registrazioni in esame. Quello che nei test era emerso come anticipo della commutazione in termini temporali, è ora ricercato in termini energetici. L'obiettivo è individuare una relazione tra entità e commutazione della tipologia di ricarica. Per individuare questo sono stati realizzati tre script (s18, s19 e s20) che consentono la creazione dei grafici seguenti (Fig. 6.14, Fig. 6.15, Fig. 6.16 e Fig. 6.17 che si riferiscono rispettivamente alle locomotive 508, 573, 575 e 594). Questi hanno in ascissa l'energia totale fornita durante la ricarica e in ordinata l'energia fornita nella fase di ricarica a corrente costante (entrambe espresse in Wh).

I grafici sono a dispersione ed ogni punto rappresenta un episodio di ricarica. Mediante dei filtri sono stati eliminati molti episodi di ricarica incompleta e/o frammentata. Questi contengono informazioni che non possono essere apprezzate con questo criterio di analisi e costituiscono un elemento di disturbo.

Il numero di episodi di scarica collezionati può esser letto da Tab. 6.1, mentre dai grafici esposti è subito evidente come ad essere scartati siano circa la metà di questi.

Come per la scarica, anche per la ricarica si ritiene che gli episodi più consistenti siano molto indicativi. Basti pensare che, al limite, una scarica completa possa creare i presupposti per evidenziare l'anticipo della commutazione. A questo punto un'eventuale ricarica completa³² mostra in modo ottimale il fenomeno (si veda Capitolo 5.4, Fig. 5.6).

³² La ricarica completa è indipendente da SoC iniziale e conduce a SoC=100%. Un'eventuale scarica completa che precede la ricarica completa garantisce SoC iniziale pari allo 0%.

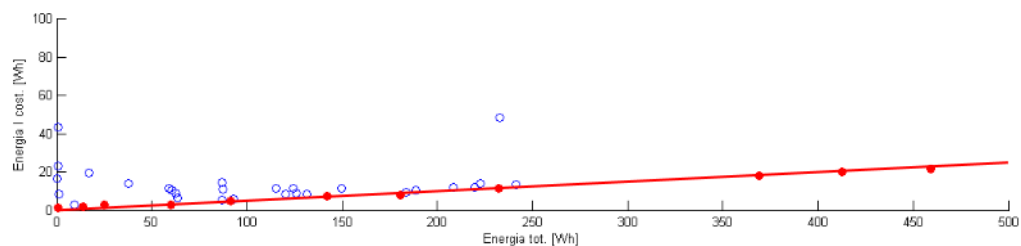


Fig. 6.14 – Relazione tra l'energia totale e l'energia nella prima fase di ricarica fornita all'accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_508

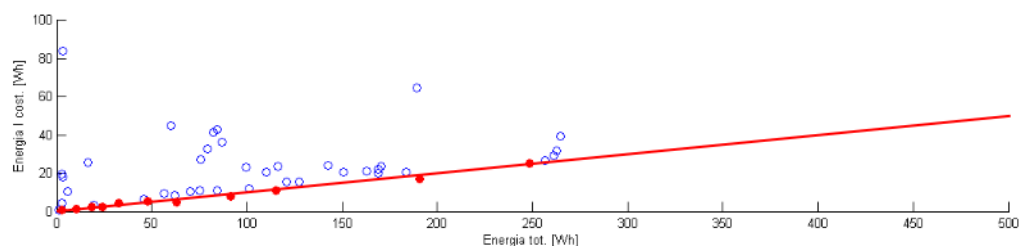


Fig. 6.15 - Relazione tra l'energia totale e l'energia nella prima fase di ricarica fornita all'accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_573

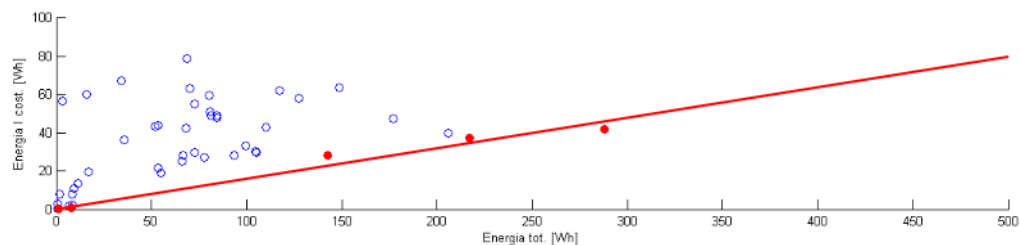


Fig. 6.16 - Relazione tra l'energia totale e l'energia nella prima fase di ricarica fornita all'accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_575

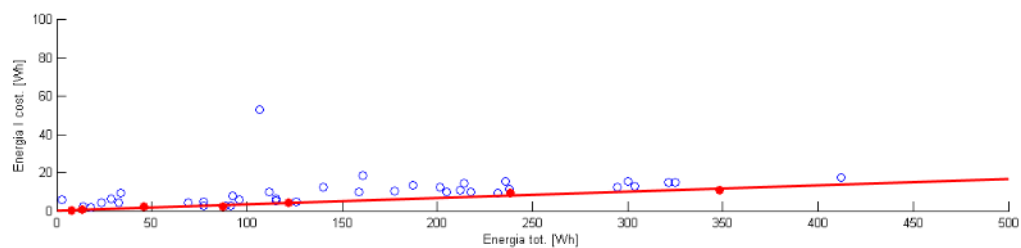


Fig. 6.17 - Relazione tra l'energia totale e l'energia nella prima fase di ricarica fornita all'accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_594

Si osserva che nelle locomotive 508 e 594 (rispettivamente Fig. 6.14 e Fig. 6.17) i punti dei grafici a dispersione sono particolarmente allineati. Questa è un'importante osservazione che conduce all'introduzione di un criterio di confronto tra gli accumulatori. Il confronto può essere fatto sovrapponendo ad ogni grafico a dispersione una linea di tendenza. Tali linee sono poi confrontate tra loro.

Come visto nel Capitolo 4.4.1, un accumulatore con celle diversificate presenta commutazione anticipata. Dal punto di vista energetico, l'energia fornita all'accumulatore nella fase a corrente costante è inferiore rispetto ad altri accumulatori. Nei grafici esposti questo confronto è visualizzabile con le pendenze delle linee di tendenza: linee molto piatte identificano gli accumulatori che ricevono meno energia degli altri nella fase a corrente costante. Se le considerazioni fatte sono corrette, linee molto piatte identificano accumulatori con celle diversificate. Viceversa linee di tendenza molto verticali identificano gli accumulatori che accettano molta energia nella fase a corrente costante, quindi con celle omogenee.

Le linee di tendenza sono state inizialmente tracciate usando regressioni lineari, questo approccio però non è valido poiché non tutti i punti della dispersione sono ugualmente significativi. I punti più a destra corrispondono a scariche maggiormente profonde a cui sono seguite ricariche più consistenti, le linee di tendenza devono quindi esser ricavate assegnando un peso maggiore ai punti più significativi (punti più a destra).

Le linee di tendenza devono inoltre passare per l'origine, poiché se l'energia totale fornita durante la ricarica tende a zero allora anche l'ordinata (che al più è pari all'ascissa) deve annullarsi.

Eventuali ricariche interrotte (non filtrate) possono comparire nel grafico. La linea di tendenza dovrebbe esser tracciata dando poco peso a questi eventi. Una scarica interrotta, nel peggiore dei casi cade nella bisettrice se tutta l'energia è fornita nella modalità di ricarica a corrente costante.

Eventuali ricariche sopra la bisettrice sono sicuramente impossibili, corrispondono al caso in cui l'energia totale immessa sia inferiore all'energia immessa in durante una fase di ricarica, quindi sono frutto di errori introdotti durante l'analisi.

Segue che i punti cui dovrebbe essere assegnato peso maggiore sono quelli posti più in basso. Questa considerazione unita al maggior peso che si vuole attribuire ai punti più a destra, portano a dire che sono complessivamente più rilevanti quei punti il cui segmento che li unisce all'origine forma un angolo piccolo con l'asse delle ascisse.

L'evidenza degna di nota emersa con questa rappresentazione ed alla luce delle considerazioni fatte è che i punti più rilevanti selezionati secondo il criterio descritto sono tra loro allineati. Non sono soltanto allineati tra loro ma anche rispetto all'origine. Si ritiene quindi che queste siano le linee di tendenza che meglio rappresentano la presenza di celle diversificate. Degno di nota è inoltre il fatto che i punti essendo poco dispersi dalle linee di tendenza permetterebbero di ricavare queste linee con buona confidenza anche senza avere a disposizione ricariche consistenti.

Nelle Fig. 6.14, Fig. 6.15, Fig. 6.16 e Fig. 6.17 sono evidenziati i punti rilevanti e tracciate le linee di tendenza. Queste permettono di affermare che l'accumulatore che presenta un comportamento peggiore è quello che equipaggia la locomotiva E464_594 poiché si presenta con un'inclinazione inferiore. Migliore è invece l'accumulatore della E464_575.

Un confronto più immediato può essere ottenuto osservando Fig. 6.18; questo grafico raccoglie tutte le rette di tendenza e consente di stilare una sorta di classifica degli accumulatori: dal migliore al peggiore (per omogeneità delle celle) si hanno gli accumulatori che equipaggiano la locomotiva 575, 573, 508 ed infine la 594.

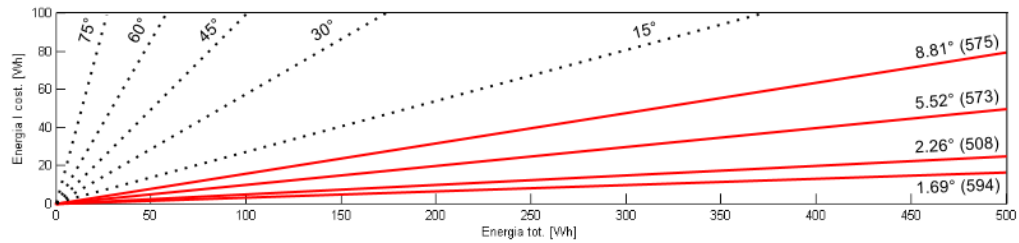


Fig. 6.18 – Confronto tra tutte le linee di tendenza

Tutti gli script necessari ad ottenere i grafici a dispersione commentati in questo capitolo sono stati raccolti ed uniti in un file eseguibile. I file (“*s18.m*”, “*s19.m*” e “*s20.m*”) sono comunque disponibili nell’impostazione utilizzata nel corso della trattazione, per agevolare l’accesso a tali risultati è stato creato un file “*.EXE*”. Questo con la stessa logica degli script, cerca la cartella “*container*” che deve esser posta nello stesso percorso relativo da cui è lanciato e crea un grafico a dispersione per una locomotiva alla volta.

CAPITOLO 7

SVILUPPI PROPOSTI

La trattazione ha come scopo l'implementazione di una manutenzione basata sull'effettivo stato di salute dell'accumulatore. L'obiettivo non è perseguibile in tempi brevi, inoltre l'efficacia della CBM dipende da molteplici fattori.

Un grande contributo al successo del CBM è sicuramente legato ai parametri monitorati, aumentarne il numero consentirebbe di stimare lo stato di salute anche in base alle sinergie tra le loro variazioni.

Si propone di inserire i parametri che differenziano gli accumulatori che sono stati identificati dalle prove di laboratorio, quali:

- controllo dell'andamento frastagliato che ha presentato la tensione durante la ricarica;
- controllo della presenza del flesso nell'andamento della corrente di ricarica in seguito alla comunicazione della modalità;
- confronto delle curve di scarica normalizza.

Le migliorie che possono essere apportate non sono legate soltanto al numero delle grandezze, passi in avanti possono esser fatti anche col monitoraggio di quelle già osservate. Questo comporta l'eliminazione di alcuni vincoli: occorre rivedere le impostazioni della strumentazione che mette a disposizione tali dati. La bassa risoluzione di alcune letture in tensione è, infatti, un handicap legato a come alcuni moduli siano programmati. Si ritiene possano essere introdotti notevoli migliorie senza inserire apparecchiature aggiuntive dedicate. La strumentazione già presente a bordo potrebbe essere sufficiente.

I moduli MCG sono i responsabili del mancato invio di alcuni file. Si propone di valutare se il modulo MCG possa esser programmato in modo da non perdere alcuna registrazione. Prima dello spegnimento della locomotiva, il pantografo è

abbassato, si attinge quindi all'energia dell'accumulatore. È stato osservato che generalmente in questa fase avvengono le scariche più profonde. L'ultimo file creato dal modulo MCG (che al massimo contiene mezzora di registrazioni) non è inviato a terra poiché la locomotiva è stata spenta ed il modulo disalimentato. In questo momento anziché inviarlo a terra, il file va perduto.

Nel modulo MCG non possono esser fatti interventi che aumentino la risoluzione delle letture, ma si ritiene che valga la pena investire del tempo nella ricerca di un metodo che consenta di non perdere i dati a disposizione, magari inviandoli alla successiva accensione.

Una volta fatto il possibile per ampliare il numero dei parametri monitorati e per migliorare la qualità delle stime si può dare inizio alla prima delle fasi descritte nel Capitolo 3.2. La fase di affiancamento preliminare, ossia un arco tempo in cui il CBM è affiancato alla manutenzione programmata, in questo periodo s'intende effettuare una prima taratura.

Il metodo proposto è quello di creare un sistema di feedback tra gli accumulatori osservati. Il meccanismo può funzionare stilando un elenco degli accumulatori che secondo i parametri monitorati appaiono maggiormente discostati dai dati di targa. Individuato l'accumulatore che appare peggiore degli altri, si propone di sostituirlo con uno sano. La locomotiva, in seguito al controllo di officina può tornare in opera con un altro accumulatore. Questo è in salute, analogo per marca e modello ma soprattutto deve esser stato caratterizzato in laboratorio prima della messa in opera.

Caratterizzando anche l'accumulatore estratto dalla locomotiva, è ora evidente che si possono valutare le differenze tra i due: per entrambi si hanno a disposizione le misure provenienti dalla telediagnostica e dalle prove di laboratorio. È quindi possibile accertare la bontà delle stime fatte ed eseguire una taratura dell'algoritmo che implementa il CBM.

Le migliorie descritte finora potrebbero essere apportate senza nessuna componente aggiuntiva. Durante le primissime fasi dello studio, sono stati valutati vari aspetti, tra cui la possibilità d'implementazione del CBM mediante

l'installazione di dispositivi dedicati. Occorre tener presente che nuovi dispositivi comportano più parti da mantenere ed il rischio di malfunzionamento di queste comporterebbe il malfunzionamento del CBM. Alla luce di queste considerazioni e per aspetti economici si è scelto d'imporre il vincolo di non modificare in alcun modo il sistema locomotiva ed usare solo le grandezze a disposizione. Ragionevolmente, si potrebbero togliere alcuni vincoli, soprattutto quelli legati alla programmazione dei moduli, in modo tale da trovare la configurazione che meglio concilia CBM e bassa invasività dell'approccio.

Si segnalano alcuni metodi che prevedendo parti aggiuntive dedicate sono stati scartati:

- stima dei parametri interni della batteria mediante l'iniezione di armoniche [15];
- misura di tensione e temperatura delle singole celle.

In seguito alla prima fase di taratura del CBM, possono essere stabilita dei limiti a soglia per i parametri della batteria. Questi fungono da allarme e possono anticipare la manutenzione programmata quando necessario [16].

Affinata la taratura, si prospetta la possibilità di diradare gli intervalli in cui la manutenzione programmata è prevista; la presenza del CBM garantisce comunque elevata affidabilità e vita delle componenti. Il processo di sostituzione della manutenzione programmata con il CBM è lento e graduale ma può condurre ad una sostituzione completa.

CONCLUSIONI

Lo studio condotto sull'accumulatore evidenzia come, senza l'utilizzo di apparecchiature dedicate, sia possibile adottare un approccio manutentivo bastato sullo stato attuale delle componenti.

Le prove di laboratorio effettuate sui due accumulatori, uno vecchio ed uno nuovo, hanno dimostrato come questi siano distinguibili dal comportamento delle grandezze elettriche. In particolare l'accumulatore vecchio presenta il degrado delle celle non omogeneamente ripartito: queste appaiono diverse tra loro. La condizione emerge sia da prove di scarica completa, sia osservando la ricarica.

Le evidenze sperimentali sono state ritrovate nelle locomotive in opera, che possono essere monitorate grazie alla telediagnostica. Durante il quotidiano esercizio delle locomotive non si sono mai verificate scariche complete degli accumulatori. Gli episodi di scarica coinvolgono piccole percentuali dell'energia complessiva immagazzinata negli accumulatori. Le evidenze emerse in laboratorio sono quindi state ricercate mediante un'analisi della ricarica.

La telediagnostica ha permesso di ritrovare l'anticipo della commutazione tra le fasi di ricarica (corrente costante, tensione costante) riscontrato nelle prove al banco. Questo è il principale risultato ottenuto poiché consente di ordinare gli accumulatori in base al livello stimato di diversificazione delle celle.

Per automatizzare l'analisi introdotta è stato scritto un software in linguaggio MATLAB. Inoltre sono stati proposti gli sviluppi ritenuti più idonei per un'implementazione ottima del CBM.

BIBLIOGRAFIA

[1] CONVEGNO

Maraini, E. (2008) *“L’elettrificazione delle ferrovie italiane. Una storia di coraggiosa intraprendenza e di incapacità a seguire una coerente politica industriale, in Storia dell’Ingegneria”*, Atti del 2° Convegno Nazionale. Napoli, 7-8-9 aprile 2008, Cuzzolin editore, tomo I, pp. 223-235.

[2] SITO WEB

AmiciTreni.it, *“Centenario dello stabilimento di Vado Ligure”*, <www.amicitreni.it>, <www.trenomania.it> , agg. 8 Dicembre 2005.

[3] COMUNICATO STAMPA

Trenitalia, *“Bombardier e Trenitalia siglano un contratto per altre 50 locomotive e464”*, < <http://www.trenitalia.com/>>. Roma, 27 aprile 2011.

[4] PUBBLICAZIONE

Pop, V. et al. (2005) *State-of-the-art of battery state-of-charge determination. Measurement Science and Technology*. pp. 93-10.

[5] MATERIALE MESSO A DISPOSIZIONE DALL’AZIENDA

Manuale di manutenzione di primo livello, Volume 11B. Caricatore servizi ausiliari e caricabatterie (tipo polycontrol). Edizione Febbraio 2006.

[6] CONFERENZA

Mantero S. et al., *“DC-bus voltage control for double star asynchronous fed drive under fault conditions”*, Power Electronics Specialists Conference, 2000. IEEE 31st Annual (2000), vol.1, pp.533-538.

[7] CONFERENZA

Bieber, A.C. (2001) "*Progress in railway mechanical engineering 1999-2000 survey-locomotives*", Proceedings of the Railroad Conference, pp.265-274.

[8] LIBRO

Perticaroli, F. (1994) *Sistemi elettrici per I trasporti. Trazione elettrica*, Milano, Masson.

[9] MATERIALE MESSO A DISPOSIZIONE DALL'AZIENDA

Materiale ad accesso riservato messo a disposizione di Bombardier Transportation Italy

[10] DATASHEET

Saft, "*MRX Ni-Cd battery The compact high-energy railway backup battery*", Datasheet, Dicembre 2009, pp. 4.

[11] DATASHEET

Marathon Battery Company, "*Care and Maintenance of Nickel-Cadmium Batteries*".

[12] PUBBLICAZIONE

Shukla, A.K. et al. (2001) "*Nickel-based rechargeable batteries*", Journal of power sources, Vol. 100, pp. 125-148.

[13] PUBBLICAZIONE

Scardaville, P.A. (1993) "High power vented nickel cadmium cells designed for ultra low maintenance", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol.8, Edizione 5, pp.16-24.

[14] NORMATIVA

IEEE Recommended Practice for Installation, Maintenance, Testing, and

Replacement of Vented Nickel-Cadmium Batteries for Stationary Applications.

[15] CONFERENZA

Kato, N. (1995) "*Estimation of the capacity of nickel-cadmium batteries by measuring impedance using electrolyte-deficient battery characteristics*", 17th International Telecommunications Energy Conference, pp.772-777.

[16] LIBRO

Isermann, R. (2011) "*Fault-diagnosis applications model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems*", Berlin Heidelberg New York: Springer.

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1 – Lo stabilimento di Vado Ligure negli anni '10.....	11
Fig. 1.2 - Locomotiva E550, "Gigante dei Giovi"	12
Fig. 1.3 – Lo stabilimento di Vado Ligure negli anni '00.....	14
Fig. 1.4 – Vista laterale della locomotiva e posizione del vano batteria [4].....	16
Fig. 1.5 – Circuito di potenza, schema di principio [7].....	19
Fig. 1.6 - Carichi alimentati dai BUR, schema di principio	20
Fig. 1.7 - Composizione locomotiva singola (direzione sinistra), slave 78 poli o TCN (direzione destra)	22
Fig. 1.8 - Composizione master 78 poli o TCN (direzione sinistra), slave 78 poli o TCN (direzione destra)	22
Fig. 1.9 - Composizione router slave 78 poli o TCN e slave 78 poli o TCN	22
Fig. 1.10 - Configurazione master TCN e slave TCN (direzione sinistra), slave TCN e router slave 78 poli-master TCN (direzione destra)	22
Fig. 1.11 - Configurazione master TCN e slave TCN (direzione sinistra), slave TCN e router slave 78 poli-master TCN (direzione destra)	22
Fig. 1.12 – Disposizione dei moduli caricabatterie e batteria nel sottocassa.....	24
Fig. 1.13 - Tensione d'uscita del CBS in funzione della temperatura [9].....	25
Fig. 1.14 - Schema di principio di collegamento dei CBS [9]	26
Fig. 1.15 - Collegamento tra le celle che compongono la batteria [9]	27
Fig. 2.1 – Principio di funzionamento di una cella Ni-Cd Sealed Type [7].....	32
Fig. 2.2 – Tensione di carica per corrente pari a C/10 in diverse tipologie di batteria ..	34

Fig. 2.3 – Massima tensione di ricarica raccomandate nella fase “tensione costante” in funzione della temperatura	34
Fig. 2.4 – Curva di scarica a corrente nominale a differenti temperature per una batteria Saft modello MRX [10].....	35
Fig. 2.5 – Capacità resa dalla batteria al variare della corrente erogata a 20°C per una batteria Saft modello MRX [10].....	35
Fig. 2.6 - Tipiche curve di scarica a diverso numero di cicli per batteria Ni-Cd sigillata [11].....	36
Fig. 2.7 – Andamento delle grandezze elettriche (tensione CBS e tensione batteria sovrapposte nella parte superiore del grafico) e corrente (nulla) sovrapposte al profilo di velocità (in scala 1/10) su E 464 508 in servizio il 2 Luglio 2011, registrazione di 1800 secondi.....	37
Fig. 2.8 – Andamento delle grandezze elettriche a seguito di una manovra durante il normale esercizio della locomotiva E 464 573, 30 Giugno 2011	39
Fig. 3.1 – Schema visivo per la manutenzione di primo livello.	43
Fig. 4.1 – Specifiche tecniche fornite con le batterie e relative etichette con data di produzione ai bordi.	54
Fig. 4.2 – Circuito di prova realizzato per i test al banco delle batterie	55
Fig. 4.3 – Da sinistra: caricabatterie, batteria nuova, batteria vecchia. Sotto: wattmetro YOKOGAWA WT1600.....	56
Fig. 4.4 – Resistenza calcolata dal rapporto tensione di batteria e corrente erogata durante la scarica sul parallelo dei reostati.	58
Fig. 4.5 – Tensione durante la prima scarica della batteria vecchia sui reostati in parallelo.	59
Fig. 4.6 – Tensione di batteria [V] nei primi 10 secondi dall’inserzione del carico	60
Fig. 4.7 – Fenomeno dell’inversione della polarità della cella [12]	62
Fig. 4.8 – Panoramica dei campionamenti di tensione con dati emersi dall’analisi grafica e tensione misurata al termine della scarica.....	63

Fig. 4.9 – Evoluzione della tensione per la batteria vecchia sottoposta a prova frazionata.	65
Fig. 4.10 – Potenza erogata dalla batteria nel corso della prova frazionata, l'area sottesa alla curva di potenza è proporzionale all'energia erogata.	66
Fig. 4.11 – Confronto tra gli andamenti di tensione della scarica frazionata dell'accumulatore nuovo con quello vecchio opportunamente scalato.	68
Fig. 4.12 – Buchi di tensione in seguito a scarica frazionata su una batteria di tipo sigillato a diversi livelli d'invecchiamento.	69
Fig. 4.13 – Confronto tra gli andamenti di tensione e corrente nella fase di cambio di modalità da corrente costante (primi 300 s, 5 minuti) a tensione costante.	71
Fig. 4.14 – Fronte di salita della tensione nei due accumulatori prima della commutazione della modalità di ricarica.	72
Fig. 4.15 - Fronte di discesa della corrente nei due accumulatori in seguito alla commutazione della modalità di ricarica.	73
Fig. 5.1 – Serie di eventi d'utilizzo dell'accumulatore registrati da entrambi i caricabatterie.....	77
Fig. 5.2 – Andamento concettuale della tensione per la realizzazione della “curva di scarica normalizzata”	81
Fig. 5.3 – Tensione di batteria letta dal modulo AX durante una scarica.....	83
Fig. 5.4 – Tensione misurata in un andamento tipico della scarica con variabili rappresentative	84
Fig. 5.5 – Andamento della tensione di batteria e della tensione di cella ipotizzata durante la ricarica a corrente costante	86
Fig. 5.6 – Andamento della tensione di batteria e della tensione di cella ipotizzata durante la ricarica a corrente costante con un elemento di capacità ridotta	87
Fig. 6.1 – Concetto utilizzato per la scrittura del codice, i blocchi in giallo sono eseguiti una sola volta.	90

Fig. 6.2 – Organizzazione dei campionamenti nella struttura dati “C” contenente tutte le registrazioni utili presenti nei file situati in “.\\container”	93
Fig. 6.3 – Schema del flusso dati nel processo d’importazione.....	96
Fig. 6.4 – Dipendenza dalla temperatura della tensione di fine carica, misurata dal CB1 (chiaro), modulo AX (scuro) per la locomotiva E464_508	99
Fig. 6.5 – Dipendenza dalla temperatura della tensione di fine carica, misurata dal CB1 (chiaro), modulo AX (scuro) per la locomotiva E464_594	99
Fig. 6.6 – Codice dello script quinto “s05.m”, righe 1-27	101
Fig. 6.7 - Codice dello script quinto “s05.m”, righe 28-69	102
Fig. 6.8 - Codice dello script quinto “s05.m”, righe 70-103.....	103
Fig. 6.9 - Codice dello script quinto “s05.m”, righe 105-161	104
Fig. 6.10 - Codice dello script quinto “s05.m”, righe 163-196.....	105
Fig. 6.11 - Codice dello script quinto “s05.m”, righe 198-234.....	106
Fig. 6.12 – Mappa degli script utilizzati per la costruzione della curva di scarica normalizzata (versione introdotta nel Capitolo 5.3.2)	108
Fig. 6.13 – Curva di scarica normalizzata ricostruita per l’accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_573	110
Fig. 6.14 – Relazione tra l’energia totale e l’energia nella prima fase di ricarica fornita all’accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_508	112
Fig. 6.15 - Relazione tra l’energia totale e l’energia nella prima fase di ricarica fornita all’accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_573	112
Fig. 6.16 - Relazione tra l’energia totale e l’energia nella prima fase di ricarica fornita all’accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_575	112
Fig. 6.17 - Relazione tra l’energia totale e l’energia nella prima fase di ricarica fornita all’accumulatore che equipaggia la locomotiva E464_594	112
Fig. 6.18 – Confronto tra tutte le linee di tendenza.....	115

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1.1 – Specifiche principali della locomotiva E464 [7]	18
Tab. 1.2 – Principali caratteristiche elettriche dei CBS	24
Tab. 3.1 - Intervalli di manutenzione a scadenza chilometrica	42
Tab. 3.2 - Intervalli di manutenzione a scadenza temporale.....	42
Tab. 6.1 – Informazioni rilevanti sui dati analizzati.....	94

RINGRAZIAMENTI

L'autore desidera ringraziare il Professor Angelo Tani per tutto il tempo dedicato, per gli incoraggiamenti e per aver seguito questo lavoro nonostante la distanza.

Un doveroso riconoscimento a chi ha permesso questo studio: Bombardier Transportation Italy, i correlatori Pietro Arosio e Simone Maistrello. Grazie ai colleghi, in particolare Paolo Caraffa per il suo concerto supporto tecnico.

Il periodo trascorso a Savona sarebbe stato diverso se non avessi conosciuto la famiglia Bizzo, grazie Emilio per aver permesso di raggiungere i migliori risultati tecnici e grazie Marta per l'adozione.

Il presente testo conclude un percorso di formazione che non avrei mai iniziato ne compiuto senza Leo e Damiano. Un sincero ringraziamento anche ad Ale, Anti, Barchio, Bizza e Rusna.

Tusen takk a chi non ha paura del freddo: Francesco Cassarini. Agli esami cucinati insieme ed al semestre Norvegese. Thanks to all the erasmus group which is growing and improving with somebody's better half. This group is keeping hold unexplainably despite time and distances. Thanks to who cares to build a relationship and a social network whereof the author is proud and speak very highly of. Trondheim is probably not the only common thing we share.

Un ringraziamento a Bernardo che oltre ad essere un grande amico è stato in questi anni un riferimento e ad Antonio che avrà sicuramente notato il carattere scelto in suo omaggio.

Grazie agli amici di Corridonia, amici di sempre, sempre vicini anche vivendo a Bologna.

Uno speciale ringraziamento va ad Ersilia con cui di questi ultimi mesi è stato condiviso ogni momento.

Il supporto insostituibile di Gianni, invidiabile alleato, di Franco che è stato lo spirito guida, e di Annalina che non ha mai smesso di dare attenzioni. A loro, la famiglia, che ha spinto a dare il meglio in ogni situazione, incoraggiando l'atletica e qualsiasi altra esperienza, è dedicato questo lavoro.

